



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA
MOTOR INDUKSI TIGA-FASA MENGGUNAKAN
ANALISIS *BI-SPECTRUM***

Insan Rabbani
NRP 2212100183

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh November
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

**BROKEN ROTOR BAR DETECTION IN THREE-PHASE
INDUCTION MOTOR USING BI-SPECTRUM ANALYSIS**

Insan Rabbani
NRP 2212100183

Advisor
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR
PADA MOTOR INDUKSI TIGA-FASA
MENGUNAKAN ANALISIS *BI-SPECTRUM***

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

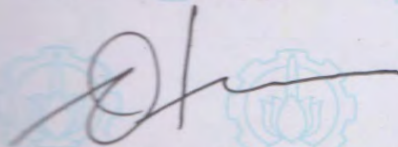
Bidang Teknik Sistem Tenaga

Jurusan Teknik Elektro

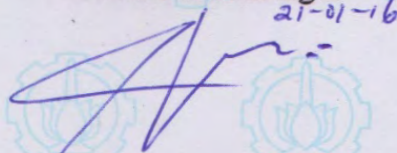
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dosen Pembimbing II

21-01-16


Timas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D

NIP 19810905 200501 1 002

Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D

NIP 19731119 200003 1 001



DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA MOTOR INDUKSI TIGA-FASA MENGUNAKAN ANALISIS *BI-SPECTRUM*

Insan Rabbani
2212100183

Dosen Pembimbing 1 : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D

Dosen Pembimbing 2 : Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Tugas Akhir ini membahas teknik deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi yang berbasis *bi-spectrum*. Metode *Bi-spectrum* diaplikasikan pada sinyal arus stator dengan tingkat pembebanan yang bervariasi. *Bi-spectrum* termasuk ke dalam *Higher Order Spectral (HOS)*, khususnya orde tiga yang diuraikan dengan Transformasi *Fourier* dengan hasil *output* berupa *contour bi-spectrum* dari sinyal arus stator dan *spectrum bicoherence*. Deteksi kerusakan batang rotor (BRB) pada motor induksi berbasis *bi-spectrum* lebih akurat dibandingkan dengan teknik lain karena *bi-spectrum* memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terutama saat motor induksi dioperasikan dalam pembebanan yang rendah sehingga dapat membedakan secara jelas antara batang rotor yang sehat dengan batang rotor yang rusak.

Deteksi BRB berdasarkan *contour bi-spectrum* kurang efektif sehingga diperlukan normalisasi *bi-spectrum (bicoherence)*. Deteksi BRB berdasarkan *spectrum bicoherence* mampu mendeteksi frekuensi baru yang timbul akibat BRB yang disebut dengan fenomena *quadratic phase coupling*.

Kata Kunci: Motor Induksi, Kerusakan Batang Rotor, BRB, *Bi-spectrum*, *Bicoherence*, *Higher Order Spectra (HOS)*, *Quadratic Phase Coupling*.

BROKEN ROTOR BAR DETECTION IN THREE-PHASE INDUCTION MOTOR USING BI-SPECTRUM ANALYSIS

Insan Rabbani
2212100183

1st Advisor

: Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D

2nd Advisor

: Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

This thesis focuses on broken rotor bar detection by using bi-spectrum. Bi-spectrum method is applied on stator current signal with various load condition. Bi-spectrum is included in Higher Order Spectral (HOS) class, specifically is the third order which is described by Fourier Transform and it results bi-spectrum contour of stator current signals and bicoherence spectrum. Broken rotor bar detection in induction motor by using bi-spectrum is more accurate than other techniques, because bi-spectrum has higher sensitivity especially when induction motor is operating at low load levels. Hence, bi-spectrum can distinguish between healthy and broken rotor bar evidently.

BRB detection based on contour bi-spectrum is less effective so bi-spectrum normalization (bicoherence) is needed. BRB detection based on spectrum bicoherence is able to detect new frequencies that generated because BRB which is called quadratic phase coupling phenomenon.

Key Words:

Induction motor, Broken Rotor Bar, BRB, Bi-spectrum, Bicoherence, Higher Order Spectra (HOS), Quadratic Phase Coupling.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala karunia dan kemudahan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Buku Tugas Akhir ini dapat terselesaikan atas bantuan banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu dan Babeh untuk kasih sayang, kepedulian, dan dukungannya. *I would not be here right now without your love and your fights for me. I will always try to make you proud.* Untuk Mba Didit dan Marham, kakak dan adik yang selalu menyemangati, memberikan saran dan menjadi panutan saya. *Do not waste anything that Ibu and Babeh do for us.*
2. Bapak Dimas Anton Asfani dan Bapak Dedet Candra Riawan atas bimbingannya selama ini, yang telah memberikan masukan sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Bapak Naryono atas ilmu praktis yang diajarkan terkait Tugas Akhir ini. Serta Bapak Faisal atas bantuannya terkait pengondisian kerusakan batang rotor.
3. Nabila, rekan saya selama pengerjaan Tugas Akhir ini. *You are one of the best partner I've ever had.*
4. Khairurizal, Mas Dimas Okky, Mas Alfian, Mas Mei, dan Luthfi atas bantuan dan diskusinya. *Thank you for the kind knowledge you share to me.*
5. Seluruh asisten Laboratorium Konversi Energi dan Tegangan Tinggi yang selalu mendukung, menyemangati, dan membantu saya selama pengerjaan Tugas Akhir ini, terutama dalam menkonfigurasi peralatan yang digunakan untuk pengujian.
6. Teman-teman HAI yang selalu ada untuk saya. *Thank you for always backing me up and helping me out. You guys color my college years such a great one.*
7. Semua teman-teman di Teknik Elektro yang selalu menyemangati saya. *Thank you for the cooperation in class, group, organization and events.*

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberi wawasan dan manfaat bagi para pembacanya.

Surabaya, 14 Desember 2015
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
 BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan dan Manfaat	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
 BAB II ROTOR MOTOR INDUKSI DAN DETEKSI KERUSAKAN	
BATANG ROTOR	5
2.1 Desain Rotor <i>Bar</i>	5
2.2 Kerusakan Rotor <i>Bar</i>	9
2.3 Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> pada Motor Induksi	11
2.4 Analisa <i>Bi-spectrum</i>	12
 BAB III PERANCANGAN TEKNIK SISTEM DETEKSI	
KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA MOTOR	
INDUKSI TIGA-FASA BERBASIS BI-SPECTRUM	15
3.1 Konfigurasi Sistem	15
3.2 Pengondisian Kerusakan Batang Rotor	19
3.4 Pembebanan Mekanis dan Elektris	21
3.5 Akuisisi Data	22
3.6 Listing <i>Bi-spectrum</i> (Pengolahan Sinyal)	23
 BAB IV PENGUJIAN TEKNIK SISTEM DETEKSI KERUSAKAN	
BATANG ROTOR DAN ANALISIS DATA	29
4.1. Akuisisi Data	30

4.2	Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> Berdasarkan Magnitude <i>Bi-spectrum</i>	32
4.2.1	Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> Saat Kondisi <i>No-load</i>	33
4.2.2	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Motor Induksi Dibebani 900 Watt	35
4.2.3	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Motor Induksi Dibebani 1.100 Watt	37
4.2.4	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Motor Induksi Dibebani 1.300 Watt	39
4.2.5	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Kondisi <i>Full-load</i>	41
4.3	Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> Berdasarkan Normalisasi <i>Bi-spectrum (Bicoherence)</i>	44
4.3.1	Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i> Saat Kondisi <i>No-load</i>	45
4.3.2	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Motor Induksi Dibebani 900 Watt	47
4.3.3	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Motor Induksi Dibebani 1.100 Watt	48
4.3.4	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Motor Induksi Dibebani 1.300 Watt	50
4.3.5	Deteksi <i>Broken Rotor bar</i> Saat Kondisi <i>Full-load</i>	52
4.4.	Pengaruh Pembebanan Terhadap Sistem Deteksi <i>Broken Rotor Bar</i>	54
BAB V PENUTUP		57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		61
Lampiran 1		61
Lampiran 2		63
Lampiran 3		69
RIWAYAT HIDUP		75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1.	Konstruksi rotor sangkar tupai [2] (a) Sketsa rotor sangkar tupai (b) Tipikal rotor sangkar tupai.....	5
Gambar 2-2.	Bagian-bagian rotor sangkar tupai [3] (a) <i>End-ring</i> yang terbuat dari tembaga (b) Konduktor batang rotor yang terbuat dari aluminium atau tembaga (c) Rotor yang telah terdiri dari laminasi	6
Gambar 2-3.	Rotor sangkar tupai [2] (a) Tipikal rotor sangkar tupai kapasitas besar (b) Tipikal rotor sangkar tupai kapasitas kecil	6
Gambar 2-4.	Laminasi rotor motor induksi [2] (a) Desain NEMA kelas A (b) Desain NEMA kelas B (c) Desain NEMA kelas C (d) Desain NEMA kelas D	7
Gambar 2-5.	Karakteristik torsi – kecepatan pada motor induksi [2]..	9
Gambar 2-6.	Kerusakan batang rotor [4] (a) <i>Half-broken</i> dan <i>full-broken rotor bar</i> (b) Batang rotor yang berlubang	10
Gambar 3-1.	Gambaran sistem pada Tugas Akhir	15
Gambar 3-2.	Peralatan yang digunakan pada Tugas Akhir (a) motor induksi tiga-fasa (b) generator sinkron (c) Cdaq-9171 dan NI 9215(d) <i>Power analyzer</i> (e) Peralatan bongkar motor (f) <i>load bank</i>	19
Gambar 3-3.	Bentuk pengondisian kerusakan batang rotor (a) BRB dengan kedalaman 3 mm dari tampak samping (b) BRB dari tampak atas (c) 3 BRB 3 mm (d) Bagian penampang rotor.....	20
Gambar 3-4.	Sistem pembebanan mekanis dan elektris	22
Gambar 3-5.	<i>Flowchart</i> akuisisi data.....	23
Gambar 3-6.	<i>Flowchart</i> proses <i>listing bi-spectrum</i>	25
Gambar 3-6.	<i>Flowchart</i> proses <i>listing bicoherence</i>	26
Gambar 4-1.	<i>Waveform</i> sinyal arus stator (a) Sinyal arus stator yang ter-sample dengan $t = 5$ sekon (b) Sinyal arus stator saat diperbesar.....	31
Gambar 4-2.	<i>Waveform</i> arus stator pada tiap level pembebanan.....	32
Gambar 4-3.	<i>Waveform</i> arus stator normal dan BRB saat <i>no-load</i>	33
Gambar 4-4.	<i>Contour bi-spectrum</i> saat <i>no-load</i> (a) <i>Contour bi-spectrum</i> normal (b) <i>Contour bi-spectrum</i> 1 BRB 3 mm (c) <i>Contour bi-spectrum</i> 1 BRB 7 mm (d) <i>Contour bi-</i>	

	<i>spectrum 3 BRB 3 mm (e) Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm</i>	<i>34</i>
Gambar 4-5.	<i>Contour bi-spectrum saat dibebani 900 W (a) Contour bi-spectrum normal (b) Contour bi-spectrum 1 BRB 3 mm (c) Contour bi-spectrum 1 BRB 7 mm (d) Contour bi-spectrum 3 BRB 3 mm (e) Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm.....</i>	<i>36</i>
Gambar 4-6.	<i>Contour bi-spectrum saat dibebani 1.100 W (a) Contour bi-spectrum normal (b) Contour bi-spectrum 1 BRB 3 mm (c) Contour bi-spectrum 1 BRB 7 mm (d) Contour bi-spectrum 3 BRB 3 mm (e) Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm.....</i>	<i>38</i>
Gambar 4-7.	<i>Contour bi-spectrum saat dibebani 1.300 W (a) Contour bi-spectrum normal (b) Contour bi-spectrum 1 BRB 3 mm (c) Contour bi-spectrum 1 BRB 7 mm (d) Contour bi-spectrum 3 BRB 3 mm (e) Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm.....</i>	<i>40</i>
Gambar 4-8.	<i>Waveform rus stator normal dan BRB saat full-load ...</i>	<i>42</i>
Gambar 4-9.	<i>Contour bi-spectrum saat full-load (a) Contour bi-spectrum normal (b) Contour bi-spectrum 1 BRB 3 mm (c) Contour bi-spectrum 1 BRB 7 mm (d) Contour bi-spectrum 3 BRB 3 mm (e) Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm</i>	<i>43</i>
Gambar 4-10.	<i>Map area dari sifat simetris bi-spectrum [6]</i>	<i>44</i>
Gambar 4-11.	<i>Spectrum bicoherence saat no-load (a) Spectrum bicoherence normal (b) Spectrum bicoherence 1 BRB 3 mm (c) Spectrum bicoherence 1 BRB 7 mm (d) Spectrum bicoherence 3 BRB 3 mm (e) Spectrum bicoherence 3 BRB 7 mm</i>	<i>45</i>
Gambar 4-12.	<i>Spectrum bicoherence saat dibebani 900 W (a) Spectrum bicoherence normal (b) Spectrum bicoherence 1 BRB 3 mm (c) Spectrum bicoherence 1 BRB 7 mm (d) Spectrum bicoherence 3 BRB 3 mm (e) Spectrum bicoherence 3 BRB 7 mm</i>	<i>47</i>
Gambar 4-13.	<i>Spectrum bicoherence saat dibebani 1.100 W (a) Spectrum bicoherence normal (b) Spectrum bicoherence 1 BRB 3 mm (c) Spectrum bicoherence 1 BRB 7 mm (d) Spectrum bicoherence 3 BRB 3 mm (e) Spectrum bicoherence 3 BRB 7 mm.....</i>	<i>49</i>

Gambar 4-14. *Spectrum bicoherence* saat dibebani 1.300 W (a) *Spectrum bicoherence* normal (b) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 3 mm (c) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 7 mm (d) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 3 mm (e) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 7 mm 51

Gambar 4-15. *Spectrum bicoherence* saat full-load (a) *Spectrum bicoherence* normal (b) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 3 mm (c) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 7 mm (d) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 3 mm (e) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 7 mm 53

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1.	Data Motor Induksi Tiga-Fasa.....	16
Tabel 3-2.	Data Generator Sinkron.....	16
Tabel 3-3.	Data Cdaq-9171	17
Tabel 3-4.	Data NI 9215	17
Tabel 3-5.	Nilai Index efisiensi <i>bi-spectrum window</i> [5]	24
Tabel 4-1.	Perbandingan daya input motor induksi dan lampu	29
Tabel 4-2.	Magnitude <i>bi-spectrum</i> saat <i>no-load</i>	35
Tabel 4-3.	Magnitude <i>bi-spectrum</i> saat dibebani 900 W	37
Tabel 4-4.	Magnitude <i>bi-spectrum</i> saat dibebani 1.100 W	39
Tabel 4-5.	Magnitude <i>bi-spectrum</i> saat dibebani 1.300 W	41
Tabel 4-6.	Magnitude <i>bi-spectrum</i> saat <i>full-load</i>	42
Tabel 4-7.	Koordinat (f_1, f_2) dan <i>bicoherence</i> saat <i>no-load</i>	46
Tabel 4-8.	Koordinat (f_1, f_2) dan <i>bicoherence</i> saat dibebani 900 W.....	48
Tabel 4-9.	Koordinat (f_1, f_2) dan <i>bicoherence</i> saat dibebani 1.100 W	50
Tabel 4-10.	Koordinat (f_1, f_2) dan <i>bicoherence</i> saat dibebani 1.300 W	52
Tabel 4-11.	Koordinat (f_1, f_2) dan <i>bicoherence</i> saat <i>full-load</i>	54
Tabel 4-12.	Magnitude <i>bi-spectrum</i> pada berbagai tingkat pembebanan	55
Tabel 4-13.	<i>Bicoherence</i> pada berbagai tingkat pembebanan	55

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Motor induksi tiga-fasa merupakan mesin listrik yang banyak digunakan untuk membantu proses produksi di industri-industri. Hal ini dikarenakan konstruksi sederhana, kokoh, perawatannya mudah, dan biaya *manufacturing* rendah. Namun, motor induksi dapat mengalami kegagalan yang berdampak terhadap *plant* industri. Hal ini berkaitan dengan biaya yang harus dikeluarkan untuk memperbaiki motor induksi dan kerugian yang harus ditanggung karena berhentinya operasi produksi. Salah satu hal yang dapat menyebabkan kegagalan motor induksi adalah kerusakan pada batang rotor (*Broken Rotor Bar* atau BRB). Contoh kerusakan pada batang rotor adalah terkikisnya batang rotor, dimana hal ini dapat menghasilkan karakteristik frekuensi harmonisa yang spesifik berhubungan dengan harmonisa orde tinggi pada arus stator yang dapat diperoleh dengan menggunakan metode-metode pengolahan sinyal (*signal processing*). Selain itu, kerusakan pada batang rotor dapat menimbulkan bunga api.

Dalam beberapa tahun ini, studi dan penelitian mengenai teknik monitoring dan deteksi kesalahan atau gangguan secara dini semakin meningkat [1]. Teknik MSCA (*Machine Current Signature Analysis*) merupakan salah satu teknik yang sering digunakan untuk mendeteksi dan mendiagnosis gangguan, baik gangguan elektrik maupun mekanik. Namun metode ini memiliki kelemahan, yaitu tidak bisa mendeteksi kerusakan ketika motor dijalankan atau dioperasikan dalam kondisi tanpa beban atau dalam pembebanan yang rendah, dimana *slip* rendah pula. Sehingga, arus stator berkurang dan deteksi gangguan pada batang rotor menjadi lebih sulit.

Oleh karena itu, dikembangkanlah metode *bi-spectrum* yang dapat mendeteksi gangguan saat motor dioperasikan dalam kondisi *slip* yang rendah. Metode ini merupakan spektrum orde tiga yang hasilnya menunjukkan *contour bi-spectrum* dalam plot frekuensi – frekuensi – magnitudo *bi-spectrum* dan *spectrum bicoherence* dalam plot frekuensi – frekuensi - *bicoherence* yang menggambarkan *coupling effect* antara beberapa sinyal pada beberapa frekuensi yang berbeda-beda. Metode *bi-spectrum* diaplikasikan pada sinyal arus stator untuk mendeteksi dan membedakan kerusakan pada batang rotor dengan tingkat pembebanan yang bervariasi.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. *Broken rotor bar* mempengaruhi performa motor induksi yang berdampak pada kegagalan produksi suatu industri sehingga diperlukan teknik deteksi dan identifikasi *broken rotor bar*.
2. Teknik atau cara mendeteksi *broken rotor bar* berbasis *bi-spectrum*.

1.3. Tujuan dan Manfaat

Penelitian pada tugas akhir ini memiliki tujuan dan manfaat sebagai berikut:

1. Tujuan

- (1) Mengaplikasikan metode *bi-spectrum* untuk mendeteksi *broken rotor bar* pada motor induksi.
- (2) Mendapatkan nilai *bi-spectrum* dan *bicoherence* dari sinyal arus stator dalam domain frekuensi.

2. Manfaat

Memberikan analisa mengenai *bi-spectrum* untuk mendeteksi, mendiagnosis, dan membedakan *broken rotor bar* pada motor induksi yang dioperasikan pada tingkat pembebanan yang bervariasi secara akurat.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan diuraikan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis motor induksi tiga-fasa yang digunakan adalah motor induksi tipe rotor sangkar tupai.
2. Objek yang dideteksi adalah kerusakan batang rotor pada motor induksi.
3. Proses pengambilan dan analisa data arus dilakukan dalam kondisi *steady state*.
4. Pengolahan sinyal yang dilakukan berbasis *bi-spectrum*.
5. Sinyal arus stator pada salah satu fasa, yaitu fasa R saja yang diolah dalam *bi-spectrum*.

1.5. Metodologi

Metode yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini terbagi menjadi beberapa tahap. Keterangan mengenai masing-masing tahapan adalah sebagai berikut:

1. Perancangan Teknik Sistem Deteksi BRB Berbasis *Bi-spectrum*

Beberapa hal yang dilakukan pada tahap ini, antara lain adalah mempersiapkan peralatan dan perangkat pengukuran yang akan digunakan, melakukan pengondisian kerusakan pada batang rotor (0 BRB, 1 BRB, dan 3 BRB) dengan diameter dan tingkat kedalaman pelubangan tertentu, mengatur pembebanan mekanis dan elektrik, mengatur parameter data akuisitor, dan melakukan pengukuran untuk memastikan peralatan sudah beroperasi dengan baik. Pada tahap ini juga dilakukan perancangan *listing* pengolahan sinyal berbasis *bi-spectrum* dengan menggunakan software MATLAB.

2. Pengujian Teknik Sistem Deteksi BRB

Selanjutnya, setelah perancangan pengolahan sinyal selesai maka akan dilakukan pengujian teknik deteksi *broken rotor bar*. Pada tahap ini pengambilan data arus stator dilakukan pada kondisi *steady state*.

3. Analisa Data

Pada tahap ini dilakukan analisa mengenai hasil pengujian teknik deteksi *broken rotor bar*. Analisa dilakukan pada tiap kondisi kerusakan batang rotor dan kondisi pada pembebanan yang bervariasi, mulai dari beban rendah dan beban tinggi.

4. Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan penyimpulan dari penelitian deteksi *broken rotor bar* berbasis *bi-spectrum* yang dilakukan pada Tugas Akhir.

1.6. Sistematika Penulisan

Tugas Akhir ini terdiri dari lima bab. Adapun susunan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. Pendahuluan

Bab ini berisi mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan dan manfaat, batasan masalah, metodologi, dan sistematika penulisan.

BAB 2. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini berisi mengenai teori-teori yang berkaitan dengan permasalahan yang dibahas pada Tugas Akhir ini, yaitu teknik deteksi *broken rotor bar* berbasis *bi-spectrum*. Teori-teori tersebut digunakan sebagai dasar dalam penulisan Tugas Akhir ini.

BAB 3. Perancangan Teknik Sistem Deteksi BRB Berbasis Bi-spectrum

Bab ini berisi rancangan mengenai bagaimana sistem dibuat dan bagaimana cara mengimplementasikan sistem tersebut.

BAB 4. Pengujian Teknik Sistem Deteksi BRB dan Analisa Data

Bab ini berisi data-data yang diolah yang diperoleh dari pengujian teknik sistem deteksi BRB yang telah diimplementasikan beserta analisa datanya.

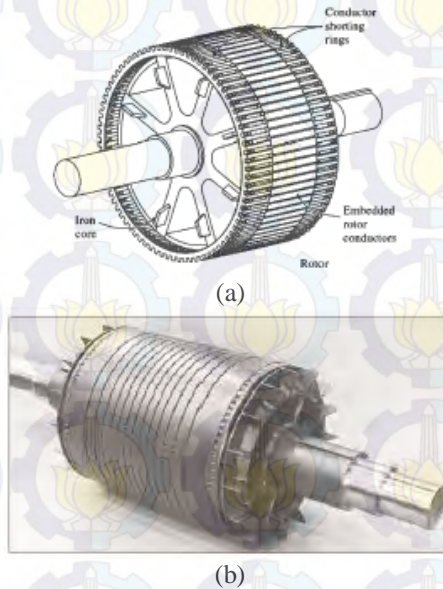
BAB 5. Penutup

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan dan saran untuk kedepannya.

BAB 2

ROTOR MOTOR INDUKSI DAN DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR

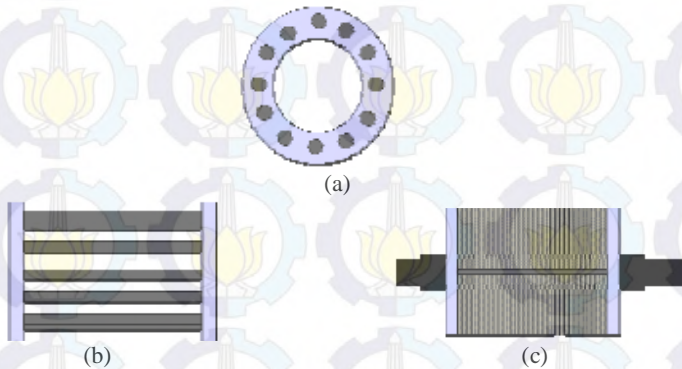
2.1. Desain Rotor *Bar*



Gambar 2-1. Konstuksi rotor sangkar tupai [2]
(a) Sketsa rotor sangkar tupai
(b) Tipikal rotor sangkar tupai

Berdasarkan tipe rotornya, motor induksi terbagi menjadi dua jenis, yaitu motor induksi tipe rotor sangkar tupai dan motor induksi tipe rotor belit. Pada Tugas Akhir ini digunakan motor induksi tipe rotor sangkar tupai. Motor induksi tipe rotor sangkar tupai memiliki konstuksi yang lebih sederhana jika dibandingkan dengan rotor belit. Dinamai rotor sangkar tupai karena apabila dilihat tanpa inti rotor, maka batang rotornya kelihatan seperti kandang tupai. Rotor motor induksi terbuat dari laminasi besi yang mempunyai slot dengan batang dari alumunium maupun

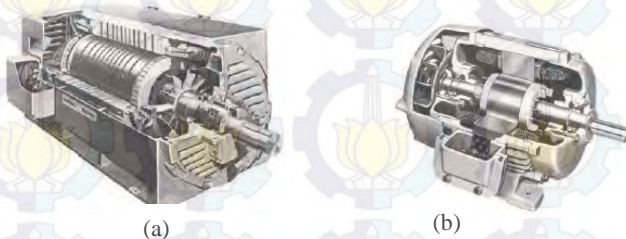
tembaga. Laminasi besi tersebut letaknya melingkar yang terikat erat pada poros. Batang rotor dan cincin ujung (*end-ring*) rotor sangkar tupai merupakan coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor.



Gambar 2-2. Bagian-bagian rotor sangkar tupai [3]

- (a) *End-ring* yang terbuat dari tembaga
- (b) Konduktor batang rotor yang terbuat dari aluminium atau tembaga
- (c) Rotor yang telah terdiri dari laminasi besi

Pada motor induksi yang berkapasitas besar, batang rotor dimasukkan ke dalam alur rotor dan tiap konduktor batang rotor ujung-ujungnya direkatkan atau dihubungkan singkat dengan cincin ujung (*end-ring*). Sedangkan, pada motor induksi berkapasitas kecil, konstruksi rotor dibentuk secara padat atau *die-cast*.



Gambar 2-3. Rotor sangkar tupai [2]

- (a) Tipikal rotor sangkar tupai kapasitas besar
- (b) Tipikal rotor sangkar tupai kapasitas kecil

Ciri-ciri dari motor induksi rotor sangkar tupai, antara lain adalah memiliki resistansi rotor yang tetap, arus starting tinggi, dan torsi starting rendah. Hal ini menyebabkan motor induksi rotor sangkar tupai kurang bagus dalam mengatasi beban dengan torsi awal yang besar. Oleh karena itu, *National Electrical Manufacture Association* (NEMA) mengklasifikasikan motor induksi berdasarkan desain batang rotor kedalam beberapa kelas. Berikut ini adalah desain rotor *bar* berdasarkan NEMA:



Gambar 2-4. Laminasi rotor motor induksi [2]

- (a) Desain NEMA kelas A – batang rotor lebar dan dekat
- (b) Desain NEMA kelas B – batang rotor lebar dan dalam
- (c) Desain NEMA kelas C – desain *double-cage* rotor
- (d) Desain NEMA kelas D – batang rotor kecil yang dekat dengan permukaan

Dengan mendesain batang rotor kedalam beberapa kelas ini, maka motor induksi dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan beban. NEMA mengkalsifikaskannya kedalam empat kelas, yaitu:

1. Tipe kelas A

Tipe ini adalah motor dengan desain standar, yaitu torsi awal normal, arus awal normal, dan slip rendah. Torsi *pullout* sebesar 200-300% dari torsi *full-load* pada *slip* rendah, kurang dari 20%. Untuk motor dengan kapasitas besar, torsi awal dari

desain motor ini sama dengan torsi *rating*nya. Sedangkan, untuk motor dengan kapasitas kecil, torsi awal 200% atau lebih dari torsi *rating*nya. Motor dengan desain kelas A memiliki arus awal yang sangat tinggi, yaitu sebesar 500-800% dari *rating* arusnya. Motor dengan desain kelas A cocok untuk beban dengan torsi awal rendah dan arus awal tinggi, seperti kipas angin dan pompa. Motor ini mampu menangani beban lebih dalam jumlah besar selama waktu yang singkat.

2. Tipe kelas B

Motor dengan desain kelas B memiliki torsi awal normal, arus awal rendah, dan slip rendah. Torsi awal motor tipe kelas B sama dengan tipe kelas A, hanya saja arus awal berkurang 25%. Torsi *pullout* sama dengan atau lebih besar dari 200% dari *rating* torsi, namun lebih kecil daripada desain kelas A karena meningkatnya resistansi rotor. Dewasa ini, tipe motor kelas B sudah banyak menggantikan tipe motor kelas A. Hal ini dikarenakan, arus awal yang dihasilkan pada tipe kelas B lebih rendah.

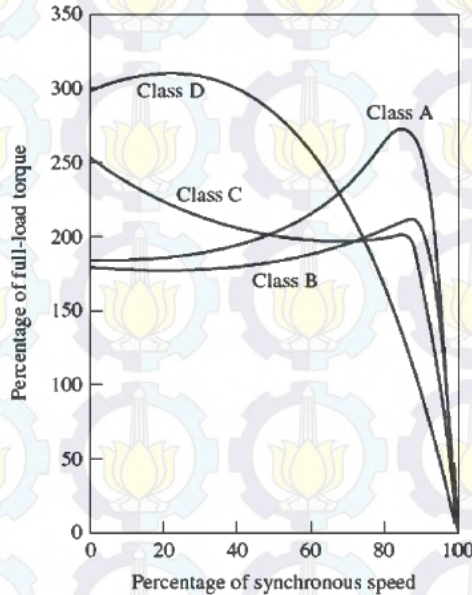
3. Tipe kelas C

Tipe ini memiliki torsi awal yang tinggi dengan arus awal rendah dan slip rendah. Torsi *pullout* jauh lebih rendah dibandingkan tipe kelas A, namun torsi awalnya meningkat 250% dari *rating* torsi. Tipe ini cocok untuk beban dengan torsi awal tinggi dan arus start rendah, seperti *conveyor*, kompresor, dan pompa. Tipe motor ini didesain dengan *double-cage* rotor sehingga harganya lebih mahal daripada motor kelas sebelumnya.

4. Tipe kelas D

Tipe ini memiliki torsi awal yang paling tinggi diantara kelas lainnya, yaitu 275% atau lebih dari *rating* torsi dan arus awal yang rendah, serta slip yang tinggi. Pada dasarnya, motor tipe ini sama dengan tipe kelas A dengan sedikit perbedaan, yaitu batang rotornya lebih kecil dan material resistansi yang lebih tinggi. Motor ini digunakan pada aplikasi yang membutuhkan percepatan dari beban yang memiliki inersia yang sangat tinggi, terutama roda gila (*flywheel*) yang digunakan untuk menekan atau memotong. Tipe kelas D cocok untuk aplikasi dengan perubahan beban dan kecepatan secara mendadak, seperti *crane* dan *elevator*.

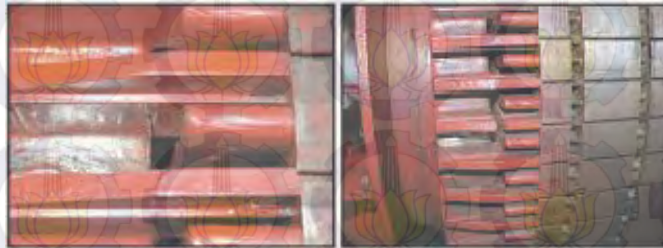
Berikut ini adalah karakteristik torsi – kecepatan masing-masing kelas:



Gambar 2-5. Karakteristik torsi – kecepatan pada motor induksi [2]

a. Kerusakan Rotor Bar

Sebuah survei telah dilakukan oleh Electrical Power Research Institute (EPRI) yang menemukan sekitar 8% dari total 6312 kasus kerusakan motor induksi diakibatkan karena masalah pada rotor [3]. Jumlah ini diperkuat oleh data dari IEEE-IAS yang juga melakukan survei dan menemukan sekitar 9% dari 1141 kasus kerusakan motor diakibatkan karena kerusakan pada rotornya [3]. Kerusakan pada batang rotor dapat berupa lecet, retak, atau terkikisnya batang rotor.



(a)



(b)

Gambar 2-6. Kerusakan batang rotor [4]

(a) *Half-broken* dan *full-broken* rotor bar

(b) Batang rotor yang berlubang

Penyebab *broken rotor bar* antara lain adalah *thermal stress* dan *mechanical stress*. *Thermal stress* berkaitan dengan desain dan konstruksi dari motor induksi. Contoh dari *thermal stress* adalah tingkat panas yang berlebih. Sedangkan *mechanical stress* ditimbulkan oleh gaya magnetik atau sentrifugal rotor yang tidak seragam, vibrasi atau getaran, dan abrasi karena beban mekanis yang bersifat *pulsating* (lonjakan secara tiba-tiba). Selain itu, *broken rotor bar* juga disebabkan karena kesalahan pada proses manufaktur atau produksi yang kurang sempurna dalam desain rotor bar tersebut dan proses pengoperasian motor induksi.

Broken rotor bar dapat mempengaruhi performa dari motor induksi yang berdampak pada kegagalan produksi suatu industri. *Broken*

rotor bar dapat menginisiasi terjadinya kerusakan pada batang rotor yang lain karena batang rotor lain yang sehat harus menanggung arus yang lebih besar dan dapat menimbulkan bunga api serta terangkat keluarnya batang rotor dari slot sehingga merusak komponen laminasi dan belitan stator. Selain itu, kerusakan batang rotor dapat menyebabkan osilasi pada pembangkitan torsi sehingga motor induksi dapat mengalami kegagalan *starting* dan dapat mengakibatkan kerusakan pada komponen lain, seperti *bearing, coupling, gearbox*. *Broken rotor bar* juga mengakibatkan gaya sentrifugal rotor tidak seragam, sehingga timbul vibrasi yang cukup besar yang dapat merusak *bearing*.

Pada motor induksi yang mengalami *broken rotor bar*, arus yang dihasilkan dari proses induksi medan stator yang mengalir pada rotor tidak terdistribusi sama rata pada seluruh rotor bar (asimetris). Batang rotor yang rusak akan mengalami penurunan kemampuan dalam mengalirkan arus sehingga arus akan dibebankan kepada batang rotor lain yang sehat. Hal ini menimbulkan ketidaksimetrian fluks medan rotor yang mengakibatkan munculnya *Back Electromotive Force (Back EMF)*. *Back EMF* menimbulkan efek harmonisa yang menghasilkan frekuensi tambahan (f_{brb}) pada arus stator yang memiliki besaran sedikit lebih tinggi atau sedikit rendah dari frekuensi fundamental. Selain menghasilkan frekuensi tambahan karena efek harmonisa, *broken rotor bar* juga dapat menimbulkan frekuensi baru yang diakibatkan adanya interaksi antara beberapa frekuensi yang *nonlinear*. Frekuensi baru yang timbul karena sistem yang *nonlinear* ini disebut dengan *quadratic phase coupling*.

2.3. Deteksi Broken Rotor Bar pada Motor Induksi

Broken rotor bar menghasilkan karakteristik frekuensi harmonisa yang spesifik berhubungan dengan harmonisa orde tinggi pada arus stator yang dapat diperoleh dengan menggunakan metode-metode pengolahan sinyal (*signal processing*). Beberapa teknik deteksi kerusakan motor induksi yang populer digunakan adalah *vibration monitoring* dan *motor current signature analysis (MCSA)*. Kerusakan batang rotor menghasilkan komponen sinyal vibrasi yang berkaitan dengan frekuensi suplai dan kecepatan rotasi. Sinyal vibrasi ini diukur dengan menggunakan sensor vibrasi yang dipasang pada *frame* stator dan spektrum dihitung dengan menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)*. Kelemahan dari metode vibrasi ini adalah dari segi biaya, dimana sensor vibrasi (*accelerometer*) harganya mahal.

Teknik MCSA dapat mendeteksi *mechanical fault* hanya dengan menggunakan sensor arus. Sinyal lain yang dapat dimonitoring adalah tegangan stator, vibrasi *shaft*, *stray flux*, torsi elektromagnetik, kecepatan, temperatur, dan *noise*. Teknik MCSA yang banyak digunakan adalah berbasis *Fourier Transform* atau disebut juga teknik MSCA dengan metode nonparametrik. Metode nonparametrik ini meliputi FFT dan *Power Spectral Density* (PSD) atau *power spectrum* (PS). FFT adalah algoritma sederhana yang efisien untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan *power spectrum* umumnya digunakan untuk menggambarkan distribusi daya dari sinyal arus dalam domain frekuensi yang dihitung dengan *Fourier Transform* (FT). Dengan kata lain, PSD atau PS adalah fungsi simetris dari frekuensi yang merupakan kuadrat dari *magnitude spectrum*, sehingga tidak mengandung informasi mengenai *phase spectrum*. Namun, teknik MCSA memiliki keterbatasan antara lain adalah tidak mengandung informasi mengenai fasanya, tidak mampu mendeteksi sinyal non-linear dan non-stasioner, dan tidak bisa mendeteksi kerusakan ketika motor dioperasikan dalam kondisi tanpa beban atau dalam pembebanan yang rendah.

Sebagai solusi dari keterbatasan teknik vibrasi dan MCSA, dikembangkanlah metode *bi-spectrum*. *Bi-spectrum* termasuk ke dalam kelas *Higher Order Spectral* (HOS) atau *polyspectra* yang digunakan sebagai representasi frekuensi dari suatu sinyal.

2.4. Analisa *Bi-spectrum*

Bi-spectrum merupakan spektrum orde tiga yang hasilnya menunjukkan plot frekuensi – frekuensi – *magnitude bi-spectrum* dan plot frekuensi – frekuensi – *bicoherence* yang menggambarkan *quadratic coupling effect* antara beberapa sinyal pada beberapa frekuensi yang berbeda-beda [1], [6]. Normalisasi *Bi-spectrum* dapat mendeteksi *quadratic phase coupling* terjadi ketika dua gelombang non-linear berinteraksi dan menghasilkan gelombang ketiga dengan frekuensi dan fase yang sama dengan jumlah dari dua gelombang pertama secara efektif.

Analisa *bi-spectrum* lebih baik bila dibandingkan dengan analisa *power spectrum*. Hal ini dikarenakan *bi-spectrum* menyimpan informasi mengenai fase dan memiliki sensitivitas yang lebih tinggi khususnya saat motor induksi dioperasikan dalam pembebanan yang rendah sehingga dapat membedakan batang rotor yang sehat dengan batang rotor yang rusak secara jelas. Selain itu, *bi-spectrum* dapat mengidentifikasi sistem non-linear dan hasil *spectrum* yang dihasilkan lebih halus dan jelas

dikarenakan *bi-spectrum* dapat mengeliminasi *noise* Gaussian. Sehingga, deteksi *broken rotor bar* pada motor induksi berbasis *bi-spectrum* lebih akurat dibandingkan dengan teknik lain karena sebagian besar sinyal dari motor induksi adalah non-linear, non-stasioner, dan non-Gaussian.

Bi-spectrum merupakan spectrum orde tiga yang dapat didefinisikan sebagai *double discrete Fourier Transform* dari momen orde tiga, sebagai berikut:

$$B(f_1, f_2) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} M_3^x(k, l) W(k, l) e^{-j \frac{2\pi}{N} (f_1 k + f_2 l)} \quad (2.1)$$

dimana,

$W(k, l)$ = *two-dimensional window function*

$M_3^x(k, l)$ = momen orde tiga

Momen orde tiga dari suatu proses $x(n)$ dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_3^x(k, l) = E \{ x^*(n) x(n+k) x(n+l) \}. \quad (2.2)$$

dimana,

k dan l = *delay* waktu diskrit

Two-dimensional window function digunakan untuk mereduksi varians dari *bi-spectrum*. Persamaan (2.1) dapat dinyatakan dalam bentuk Fourier Transform dari $x(n)$, sebagai berikut:

$$B(f_1, f_2) = E \{ X(f_1) X(f_2) X^*(f_1 + f_2) \}. \quad (2.3)$$

dimana,

f_1, f_2 = indeks frekuensi

X^* = conjugate dari X

$X(f)$ = transformasi Fourier dari sinyal diskrit $x(n)$

$E\{\cdot\}$ = rata-rata dari sinyal

Untuk memudahkan dalam komputasi, maka digunakanlah *direct method* untuk mengestimasi *bi-spectrum* dari sinyal arus stator. Estimasi *bi-spectrum* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \hat{B}(f_1, f_2) &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M X_k(f_1) X_k(f_2) X_k^*(f_1 + f_2) \\ &\approx E \{ X(f_1) X(f_2) X^*(f_1 + f_2) \} \end{aligned} \quad (2.4)$$

dimana,

M = jumlah segmentasi

X_k^* = conjugate dari X

Bentuk normalisasi dari *bi-spectrum* disebut dengan *bicoherence*. *Bicoherence* digunakan untuk mendeteksi *quadratic phase coupling* yang ditimbulkan karena interaksi beberapa frekuensi yang nonlinear. *Bicoherence* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$b^2(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{E\{|X(f_1)X(f_2)|^2\}E\{|X(f_1+f_2)|^2\}} \quad (2.5)$$

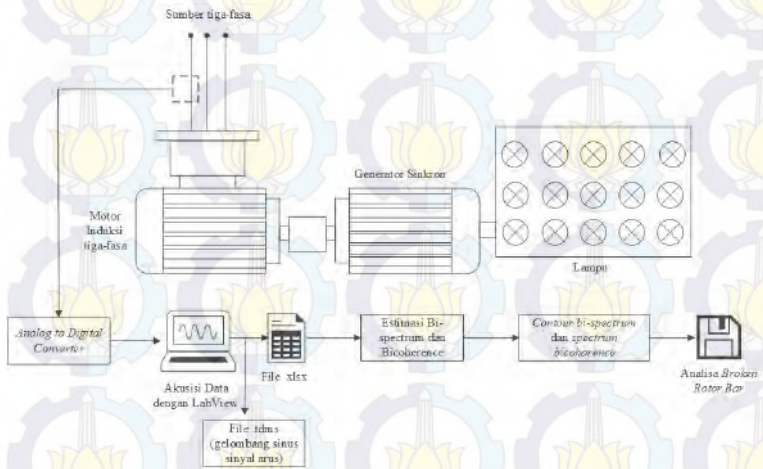
Nilai *bicoherence* dibatasi dari 0 sampai 1. Nilai *bicoherence* 0 mengindikasikan tidak adanya *quadratic phase coupling* sehingga besar derajat *phase coupling* hampir 0%. Sedangkan, nilai berapapun antara 0 sampai 1 mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling*, dimana semakin mendekati 1 maka besar derajat *phase coupling* akan hampir 100%. *Bicoherence* dapat menentukan koordinat (f_1, f_2) yang menimbulkan frekuensi baru, yang disebut *quadratic phase coupling*.

BAB 3

PERANCANGAN TEKNIK SISTEM DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA MOTOR INDUKSI TIGA-FASA BERBASIS *BI-SPECTRUM*

3.1. Konfigurasi Sistem

Sistem pada Tugas Akhir ini terdiri dari beberapa peralatan, antara lain adalah motor induksi tiga-fasa, generator sinkron sebagai beban mekanis, beberapa buah lampu sebagai beban elektris, *Analalog to Digital Converter* berupa suatu *module* yang terdiri dari cDAQ-9171 dan NI 9215, beberapa alat pengukuran seperti *power analyzer*, mesin bor, dan beberapa alat bongkar motor induksi, seperti kunci, obeng, palu, tang, serta *software* LabView, DIAdem, dan MATLAB untuk akusisi data dan *listing bi-spectrum*. Gambaran sistem deteksi kerusakan batang rotor motor induksi tiga-fasa berbasis *bi-spectrum* pada Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1. Gambaran sistem pada Tugas Akhir

Pada Tugas Ahir ini digunakan motor induksi tiga-fasa dengan kapasitas sebesar 2 HP. Motor induksi dirangkai dengan koneksi bintang (Y) dan mempunyai tegangan dan arus *rating* sebesar $V_t = 380$ V dan I_L

= 3.44 A. Berikut ini merupakan data parameter dari motor induksi tiga-fasa, generator sinkron, dan data akuisitor sebagai berikut:

Tabel 3-1. Data Motor Induksi Tiga-Fasa

Parameter Motor Induksi	Nilai
Merk	Tatung
Model	R330
Frame	
Daya Rating	1.5 kW / 2 HP
Jumlah Pole	4
Tegangan Rating	220 / 380 V
Arus Rating	3.94 / 3.44 A
Frekuensi	50 Hz
Isolasi	F
Kecepatan Rating	1380 rpm
Jumlah Konduktor Rotor	28
Ambient	40°C
F.L. Efisiensi	78.6%
F.L. Input	1.91 kW
Faktor Daya	0.6
IP	55

Tabel 3-2. Data Generator Sinkron Tiga-Fasa

Parameter Generator Sinkron	Nilai
Merk	Shantol
Tipe	GTR-5-TH
No.	929
Daya Rating	5 kW
Jumlah Pole	4
Tegangan Rating	400 V
Arus Rating	9.02 A
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan Rating	1500 rpm
Faktor Daya	0.8
Tipe Isolasi	E/B

Tabel 3-3. Data cDAQ-9171

Parameter cDAQ-9171	Nilai
Merk	National Instruments
Tipe Produk	Chassis
<i>Part Number</i>	781425-01
Jumlah Slot	1
Total Daya	2.6 W
<i>Range</i> Tegangan Input	4.75 V 5.25 V
<i>Counters</i>	4
Resolusi	32 bit

Tabel 3-4. Data NI 9215

Parameter NI 9215	Nilai
Merk	National Instruments
Tipe ADC	Delta-Sigma (with analog prefiltering)
Jumlah <i>Channel</i>	3
Resolusi ADC	24 bit
<i>Range Pengukuran Arus Input</i>	
<i>Continuous</i>	20 Arms
<i>Instantaneous</i>	20 Arms, ± 30 Apeak
<i>Typical Scaling Coefficient</i>	3.7253 $\mu\text{A/LSB}$
Arus Input Rating	22 Arms
Kopling Input	AC
Impedansi Input	0.2 mOhm
Noise Input	0.25 mArms
<i>Sample Rate</i>	50 kS/s/ch
<i>Sampling Mode</i>	Simultaneous
Isolasi	CAT III 480 Vrms Ch-Ch
Konektivitas	Ring Lug

Pada Tugas Akhir ini, data yang diolah adalah sinyal arus stator motor induksi dalam keadaan *steady state*. Sinyal arus stator ini kemudian di-sample pada frekuensi tertentu, yaitu 5.000 Hz yang selanjutnya dikirimkan ke A/D converter (cDAQ-9171 dan NI 9215) untuk diubah menjadi sinyal digital yang kemudian sinyal arus stator ditampilkan didalam LabView dalam bentuk gelombang sinus dan data numerik. Sinyal arus stator akan di-sample pada frekuensi sampling 5.000 Hz

dengan jumlah data 25.000 *samples* selama 5 sekon. Setelah melakukan proses *sampling*, maka data sinyal arus stator akan disimpan dalam format .tdms dan .xls. Plot sinyal arus stator dari ketiga fasa (R-S-T) dapat dilihat di LabView diAdem (.tdms), dimana bentuk gelombang sinyal arus stator dapat dilihat secara lebih jelas disbanding dengan bentuk gelombang yang dihasilkan di LabView. Selanjutnya, setelah proses akuisisi data selesai maka dilanjutkan dengan proses pengolahan sinyal berbasis *bi-spectrum* dengan menggunakan software MATLAB. Metode *bi-spectrum* diaplikasikan pada sinyal arus stator untuk mendeteksi kerusakan batang rotor dengan tingkat pembebanan yang bervariasi. Tingkat pembebanan elektrik yang digunakan pada Tugas Akhir ini, yaitu berkisar antara 130 – 1.500 Watt. Pengukuran arus stator dilakukan sebanyak beberapa kali sehingga didapatkan beberapa *sample* yang dimaksudkan untuk memperkecil *error* pengukuran.



(a)



(b)



(c)

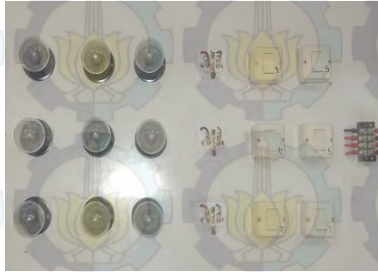


(d)



(e)





(f)

Gambar 3-2. Peralatan yang digunakan pada Tugas Akhir

- (a) Motor induksi tiga-fasa
- (b) Generator sinkron
- (c) cDAQ-9171 dan NI 9215
- (d) *Power analyzer*
- (e) Peralatan bongkar motor
- (f) *Load bank* (lampu)

Perancangan teknik sistem deteksi kerusakan batang rotor berfokus pada pengolahan sinyal arus stator berbasis *bi-spectrum* sehingga kondisi batang rotor dapat diidentifikasi apakah terjadi kerusakan atau tidak.

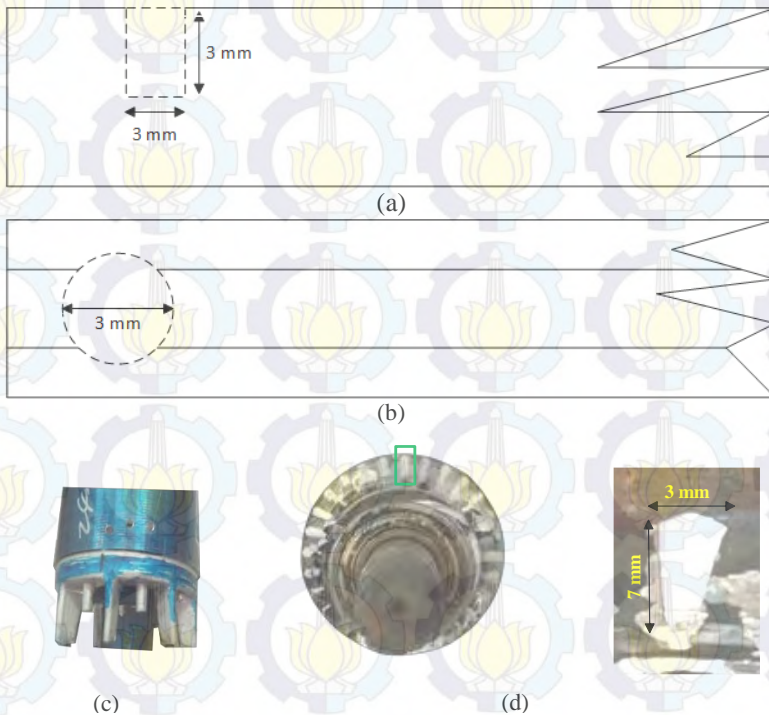
3.2. Pengondisian Kerusakan Batang Rotor

Pengondisian kerusakan batang rotor dilakukan dengan pembuatan lubang yang berdiameter 3 mm dengan kedalaman 3 mm dan 7 mm dengan menggunakan mesin bor. Pemilihan diameter dan kedalaman pelubangan batang rotor disesuaikan dengan diameter dan kedalaman batang rotor yang digunakan. Dimana, batang rotor yang digunakan memiliki diameter 3 mm dan kedalaman 7 mm. Kerusakan yang berupa pelubangan dibuat diatas konduktor batang rotor dengan tujuan akan batang rotor tersebut patah. Besaran pelubangan batang rotor adalah 3 mm dan 7 mm. Hal ini ditujukan agar terlihat perbedaan yang dihasilkan dari *contour* arus stator antara kerusakan batang rotor dengan kedalaman 3 mm dan 7 mm.

Selain itu, pada kenyataan di lapangan kerusakan batang rotor terjadi memang dengan besaran yang tidak sama dan tidak dapat ditentukan. Pelubangan dengan diameter 3 mm dan kedalaman 3 mm dan 7 mm dengan tidak merusak bagian laminasi dalam rotor, dimaksudkan agar kerusakan dari batang rotor tidak terlalu parah dimana dengan

kerusakan batang rotor yang terlalu parah dapat menimbulkan terjadi bunga api yang berdampak pada rusaknya komponen motor induksi yang lain.

Pada Tugas Akhir ini digunakan tiga tingkatan kerusakan batang rotor yang terdiri dari: a) Normal (0 BRB), b) 1 Kerusakan batang rotor (1 BRB), dan c) 3 Kerusakan batang rotor (3 BRB).



Gambar 3-3. Bentuk pengondisian kerusakan batang rotor

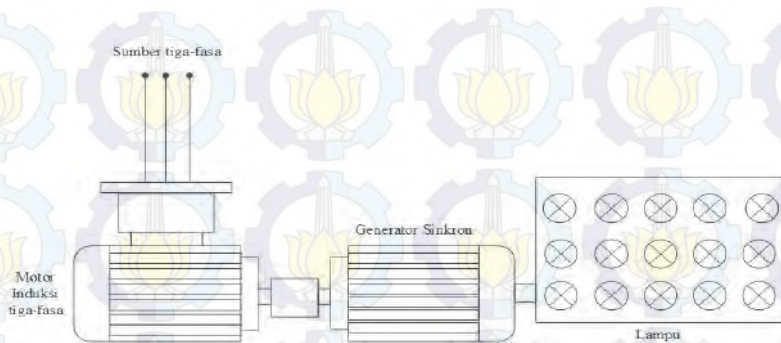
- (a) BRB dengan kedalaman 3 mm dari tampak samping
- (b) BRB dari tampak atas
- (c) 3 BRB 3 mm
- (d) Bagian penampang rotor

3.3. Pembebanan Mekanis dan Elektris

Tingkat pembebanan yang bervariasi diperlukan untuk melihat pengaruh *broken rotor bar* pada tiap tingkat pembebanan. Tingkat pembebanan akan mempengaruhi *magnitude* dan bentuk dari sinyal arus. Dalam Tugas Akhir ini, pembebanan mekanis yang digunakan adalah generator sinkron. Motor induksi terkopel dengan generator sinkron yang digunakan untuk menyalakan lampu, dimana lampu tersebut merupakan beban elektrik. Sistem kerjanya adalah generator akan memberikan torsi lawan kepada motor induksi sehingga akan terjadi proses pengereman pada motor induksi. Lampu yang digunakan sebanyak 15 buah dengan masing-masing daya dari lampu tersebut sebesar 100 W. Sehingga total daya 15 lampu adalah 1.500 W. Daya lampu akan dibandingkan dengan daya input motor.

Terdapat empat variasi tingkat pembebanan elektrik yang digunakan. Pembebanan pertama adalah saat *no-load* dimana pada saat ini motor tidak terkopel dengan generator, pembebanan kedua sebesar 1.100 W dengan menyalakan 3 lampu, pembebanan ketiga sebesar 1.300 W dengan menyalakan 6 lampu, dan pembebanan keempat adalah saat *full-load*, yaitu 1.500 W dengan menyalakan 9 lampu. Tingkat pembebanan ini dipilih agar motor induksi beroperasi dalam kondisi pembebanan rendah, sedang, hingga besar.

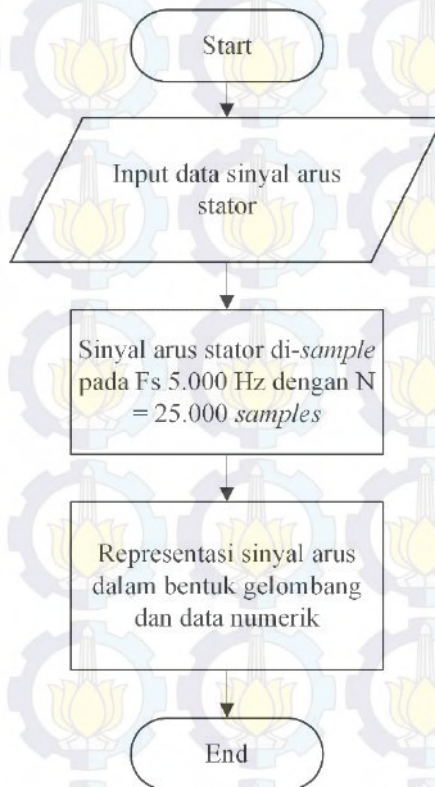
Proses pembebanan mekanis dapat mengakibatkan *mechanical stress* yang ditimbulkan oleh vibrasi atau getaran karena beban mekanis yang bersifat *pulsating*. Vibrasi yang ditimbulkan akan membuat arus yang mengalir kedalam motor induksi menjadi semakin besar dan tidak konstan. Hal ini merupakan salah satu faktor yang menyebabkan kesalahan dalam pengukuran sehingga deteksi *broken rotor bar* menjadi kurang akurat. Oleh karena itu, mekanisme *coupling* antara generator sinkron dan motor induksi yang digunakan harus diperhatikan dengan benar.



Gambar 3-4. Sistem pembebanan mekanis dan elektris

3.4. Akuisisi Data

Pada Tugas Akhir ini, A/D converter yang digunakan untuk data akuisisi adalah cDAQ-9171 dan NI 9215. Sinyal arus stator akan di-sample pada frekuensi 5.000 Hz yang kemudian diubah menjadi sinyal digital. Dengan frekuensi *sampling* 5000 Hz, maka dalam 1 detik terdapat 5.000 data dengan periode 0,2 ms. Pengambilan data sinyal arus stator ini dilakukan selama 5 detik, sehingga total jumlah data adalah 25.000 *samples*. Pengaturan frekuensi *sampling*, periode, dan jumlah data dilakukan di LabView. Sinyal arus stator yang telah di-sample akan ditampilkan di LabView dalam bentuk gelombang sinus dan data numerik sinyal arus. Bentuk gelombang sinus dan data numerik sinyal arus juga disimpan dalam format .tdms yang dapat dilihat di LabView diAdem secara lebih jelas. Dimana, plot sinyal arus stator dari ketiga fasa (R-S-T) dapat dilihat dalam satu plot. Data numerik yang diperoleh ini juga disimpan dalam format .xls agar data numerik tersebut dapat digunakan dalam *listing bi-spectrum* dengan menggunakan MATLAB. Adapun urutan proses akuisisi data yang dijelaskan dalam *flowchart* pada gambar 3-5.



Gambar 3-5. Flowchart akuisisi data

3.5. Listing Bi-spectrum (Pengolahan Sinyal)

Pada Tugas Akhir ini diperlukan *listing bi-spectrum* dengan menggunakan MATLAB untuk mengolah sinyal arus yang telah direkonstruksi sehingga teknik sistem deteksi *broken rotor bar* dapat dilakukan. Dimana pada hal ini, sistem mampu untuk mendeteksi apakah terjadi kerusakan batang rotor atau tidak pada motor induksi. Sinyal arus yang telah direkonstruksi pada salah satu fasanya, yaitu fasa R yang hanya akan diolah dengan *listing bi-spectrum*. Terdapat dua cara untuk mengestimasi *bi-spectrum*, yaitu dengan *indirect method* dan *direct method*. Dalam Tugas Akhir ini menggunakan *direct method*. Secara garis

besar proses didalam estimasi *bi-spectrum* dengan *direct method* terdiri dari tiga proses.

Proses pertama adalah input data sinyal arus akan dibagi kedalam beberapa *segment* dengan *window function*. Hal ini dikarenakan untuk memudahkan dan menghemat waktu komputasi. Window function yang digunakan pada analisa *bi-spectrum* ini adalah Rao-Gabr Window. Hal ini dikarenakan *mean square error* yang dihasilkan adalah minimum dibanding dengan window function yang lain yang dapat diketahui dengan semakin kecilnya nilai E_b (index efisiensi) dari *window bi-spectrum*. Berikut ini adalah perbandingan nilai index efisiensi antara beberapa *window*:

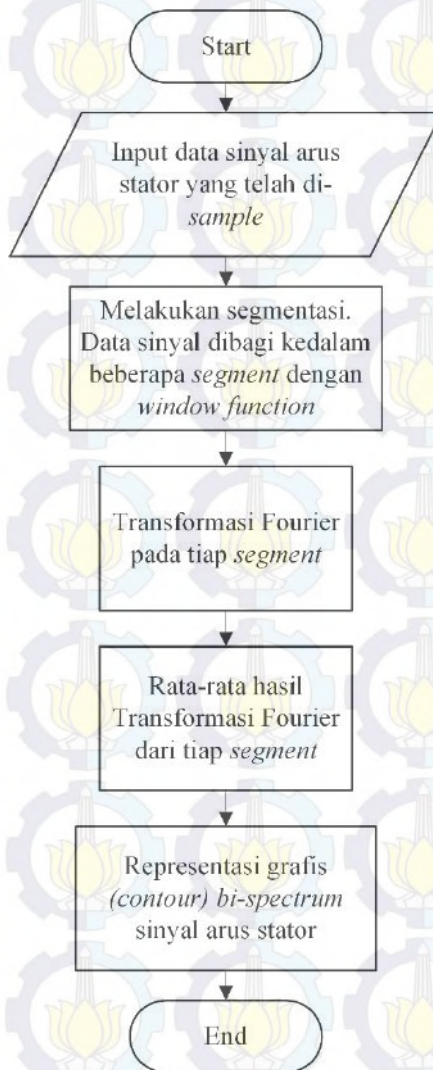
Tabel 3-5. Nilai index efisiensi *bi-spectrum window* [5]

Bi-spectrum Window	E_B
Daniell	1.65
Turkey-Hanning	1.63
Parzen	2.04
Gartlett-Priestley	1.65
Rao-Gabr	1.47

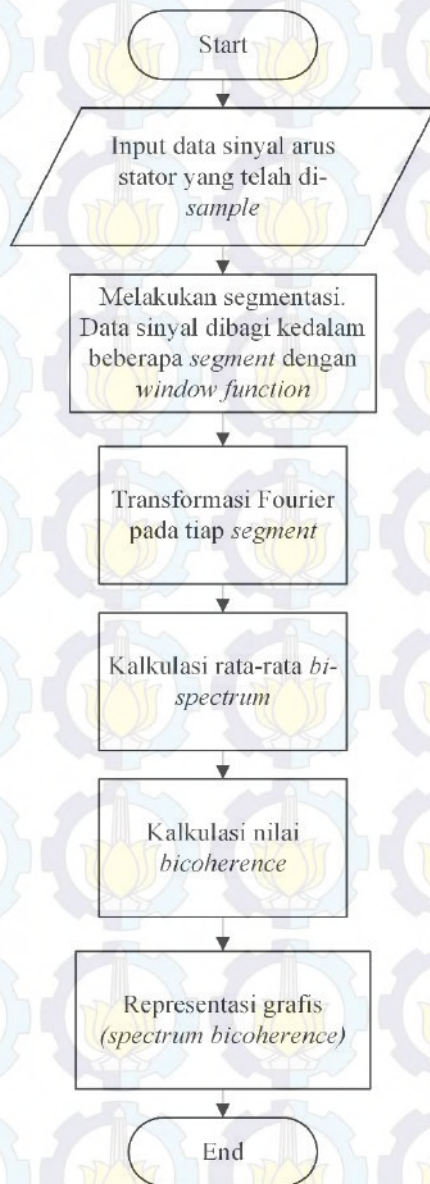
Rao-Gabr *window* memiliki permukaan yang lebih rata dibandingkan dengan window lainnya dan Transformasi Fourier dari window ini akan seperti *two-dimensional direct delta functions* yang memusatkan semua massanya disekitar titik asal (0,0) [5].

Proses kedua adalah melakukan *double discrete Fourier Transform* pada tiap *segment*. Fungsi dari sinyal arus yang berdomain waktu diubah kedalam domain frekuensi. Maksud dari *double discrete Fourier Transform* adalah melakukan transformasi Fourier pada variabel yang pertama dan melakukan transformasi Fourier pada variabel yang kedua. Hal ini dikarenakan fungsi sinyal arus stator mengandung dua variabel, dimana variabel tersebut adalah *delay* waktu diskrit. Proses ketiga adalah mencari ekspektasi atau rata-rata hasil transformasi Fourier dari tiap *segment*.

Hasil *output* dari tiga proses estimasi *bi-spectrum* ini adalah berupa *contour* yang menunjukkan frekuensi – frekuensi – *magnitude bi-spectrum*. Adapun urutan proses *listing bi-spectrum* yang dijelaskan dalam *flowchart* pada gambar 3-6.



Gambar 3-6. Flowchart proses listing *bi-spectrum*



Gambar 3-7. Flowchart proses listing bicoherence

Deteksi kerusakan batang rotor juga dapat diindikasikan dengan adanya *quadratic phase coupling*. *Quadratic phase coupling* ini dapat dideteksi dengan *bicoherence* yang merupakan bentuk normalisasi dari *bi-spectrum*. Urutan proses *listing bicoherence* dijelaskan dalam *flowchart* pada gambar 3-7.

BAB 4

PENGUJIAN TEKNIK SISTEM DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR DAN ANALISIS DATA

Dalam bab ini akan dibahas mengenai hasil dari pengujian teknik sistem deteksi *broken rotor bar* pada motor induksi yang telah dibuat dan analisa mengenai data-data yang diperoleh dari pengujian tersebut. Beberapa peralatan pengukuran dan listing sinyal pengolahan diperlukan dalam sistem deteksi ini. Pengujian teknik sistem deteksi *broken rotor bar* dilakukan secara *on-line* (saat motor beroperasi), sehingga data yang dihasilkan *real-time*. Berikut ini adalah gambar dari sistem deteksi *broken rotor bar*:

Pada pengujian ini, frekuensi *sampling* yang digunakan adalah 5.000 Hz dengan jumlah data 25.000 *samples* selama 5 sekon. Selain itu, variasi pembebanan elektrik juga digunakan dalam sistem pengujian ini dimana diperlukan perbandingan antara daya input motor dan daya lampu. Hal ini dikarenakan dengan menyalakan semua lampu sebanyak 15 buah dengan total daya sebesar 1.500 W, melebihi rating daya motor. Oleh karena itu, pengukuran daya input motor menggunakan *power analyzer* diperlukan untuk melihat berapa besar daya motor seiring kenaikan beban elektrik. Berikut ini adalah hasil yang didapatkan dari pengukuran, sebagai berikut:

Tabel 4.1. Perbandingan daya lampu dan motor induksi

Jumlah Lampu	Daya Input Lampu	Daya Input Motor Induksi
0	<i>No-load</i>	130 W
3 buah	300 W	1.100 W
6 buah	600 W	1.300 W
9 buah	900 W	1.500 W

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa, dengan menyalakan 9 buah lampu dengan total daya 900 W sama dengan rating daya *full-load* motor, yaitu 1.500 W. Adanya perbedaan ini dikarenakan motor induksi terkopel dengan generator sinkron yang berfungsi untuk menyalakan lampu sebagai beban elektrik. Generator sinkron tersebut merupakan beban mekanis yang memiliki momen inersia yang besar sehingga dengan

terkopelnya motor induksi dengan generator sinkron, daya motor induksi yang terukur telah mencapai 900 W. Sehingga, tingkat pembebanan yang digunakan dalam Tugas Akhir, adalah saat motor induksi dalam kondisi *no-load*, saat terkopel dengan generator yaitu 900 W, saat dibebani 1.100 W dan 1.300 W, serta saat motor dalam kondisi *full-load* yaitu 1.500 W.

Output dari pengujian sistem ini adalah *contour* dari sinyal arus stator dan *spectrum bicoherence* yang merupakan diagnosa mengenai kondisi kerusakan batang rotor pada motor induksi. Pengujian teknik sistem *broken rotor bar* pada Tugas Akhir ini, meliputi:

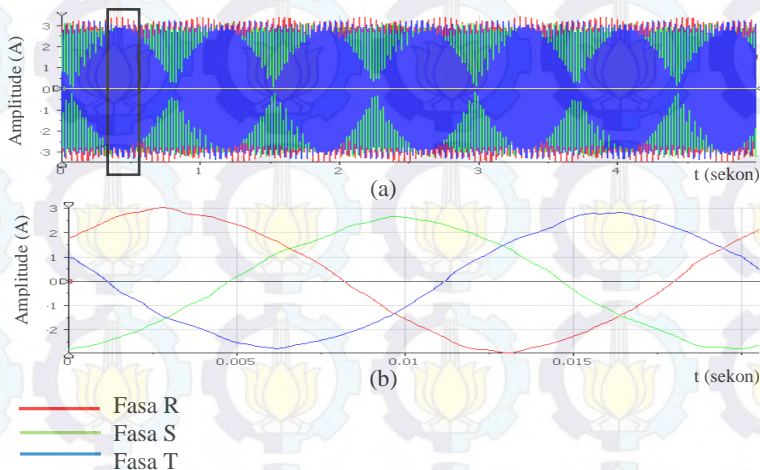
1. Akuisisi data dengan bantuan software LabView dan DIAdem,
2. Proses deteksi *broken rotor bar* pada motor induksi menggunakan analisa *bi-spectrum* dengan variasi tingkat kerusakan batang rotor,
3. Proses deteksi *broken rotor bar* pada motor induksi menggunakan analisa *bi-spectrum* dengan variasi pembebanan elektrik, dimana motor dioperasikan dari kondisi *no-load* hingga *full-load*.

Pengujian sistem deteksi ini berfokus pada analisa *bi-spectrum* yang diaplikasikan pada sinyal arus stator dalam kondisi *steady-state*. Pengujian ini akan membandingkan motor dalam kondisi normal dan motor yang mengalami *broken rotor bar*.

1.1. Akuisisi Data

Akuisisi data merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk mengambil dan memproses data sehingga menghasilkan data yang dikehendaki. Data yang dikehendaki adalah data sinyal arus stator motor induksi dalam keadaan *steady-state* dengan frekuensi *sampling* yang tinggi, yaitu 5.000 Hz. Pemilihan frekuensi tinggi ini didasarkan beberapa faktor, yaitu kapasitas motor lebih dari 1 HP sehingga dibutuhkan frekuensi *sampling* yang tinggi pula, dan semakin tinggi frekuensi *sampling* yang digunakan maka resolusi akan semakin bagus sehingga data yang dihasilkan akan semakin akurat.

Akuisisi data pada Tugas Akhir ini melibatkan program LabView dan DIAdem dengan module cDAQ-9171 dan NI 9215 sebagai A/D Converter. Diagram blok sistem akuisisi data dibuat didalam LabView. Blok diagram terlampir di lampiran 1. Berikut ini adalah salah satu bentuk gelombang sinus sinyal arus stator yang ter-*sample*:



Gambar 4-1. Waveform sinyal arus stator

- (a) Sinyal arus stator yang ter-sample dengan $t = 5$ sekon
 (b) Sinyal arus stator saat diperbesar

Gelombang sinus yang berwarna merah menunjukkan fasa R, warna hijau menunjukkan fasa S, dan warna biru menunjukkan fasa T. Tiap fasa ini memiliki perbedaan 120° . Grafik pada gambar 4-3 merupakan grafik sinyal arus stator dalam domain waktu yang tercapture di DIAdem selama 5 sekon untuk setiap pengukuran. Dengan frekuensi *sampling* (F_s) 5.000 Hz dan $t = 5$ sekon, maka total jumlah data dapat dicari dengan rumus:

$$n = F_s \cdot t$$

Sehingga total jumlah data arus stator yang tersample sebanyak 25.000 samples.

Amplitude arus ini akan terus berubah-ubah seiring dengan tingkat pembebanan yang diberikan. Semakin tinggi tingkat pembebanan maka torsi semakin besar sehingga amplitude arus yang terbaca semakin tinggi pula. Hal ini sesuai dengan rumus:

$$T = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

dimana,

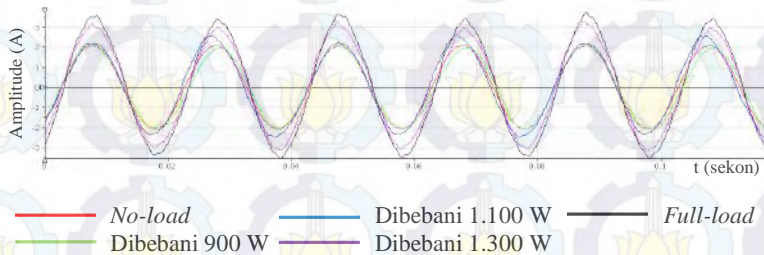
T = Torsi

k = konstanta motor induksi

Φ = Fluks

I_a = Arus stator

Berikut ini merupakan contoh perubahan amplitude arus pada fasa R dengan tingkat pembebanan yang berbeda:



Gambar 4-2 Waveform arus stator pada tiap level pembebanan

Dengan meningkatnya pembebanan juga akan berdampak pada penurunan kecepatan motor yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P = T \cdot \omega$$

dimana,

P = Daya output motor induksi

T = Torsi

ω = Kecepatan putar motor dalam rad/s

Data sinyal arus stator tersebut kemudian akan diolah dengan analisa *bi-spectrum*. Pada Tugas Akhir ini sinyal arus stator yang diolah hanya sinyal arus stator fasa R. Hal ini dikarenakan dengan mengolah arus stator pada salah satu fasa, kerusakan batang rotor dapat dideteksi.

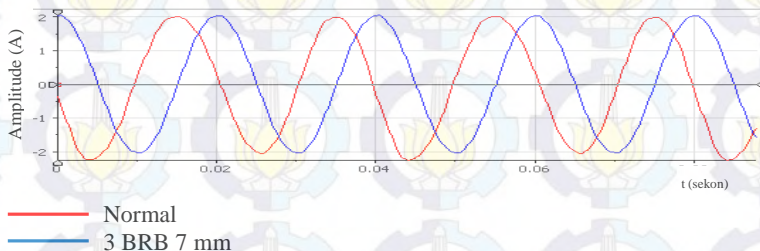
1.2. Deteksi Broken Rotor Bar Berdasarkan Magnitude *Bi-spectrum*

Bi-spectrum dapat mendeteksi kerusakan batang rotor pada tiap pembebanan dengan berdasarkan pada estimasi nilai magnitude *bi-*

spectrum. Output dari *bi-spectrum* ini menunjukkan *contour bi-spectrum* sinyal arus stator pada plot frekuensi – frekuensi – magnitude *bi-spectrum*. Berikut ini merupakan bahasan mengenai deteksi *broken rotor bar* berbasis magnitude *bi-spectrum* pada setiap *level* pembebanan.

1.2.1. Deteksi *Broken Rotor Bar* Saat Kondisi *No-load*

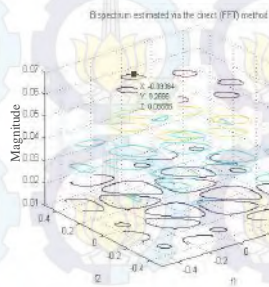
Pengujian sistem deteksi *broken rotor bar* dilakukan saat motor induksi dalam kondisi *no-load* (belum dibebani) dahulu. Berdasarkan hasil eksperimen pada kondisi *no-load*, sinyal arus stator dalam bentuk gelombang sinus antara batang rotor normal dan yang mengalami BRB tidak terlihat perbedaan yang signifikan. Berikut ini adalah gambar sinyal arus stator dalam bentuk gelombang sinus saat normal dan mengalami BRB:



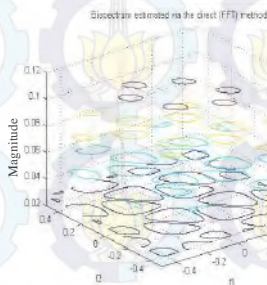
Gambar 4-3. *Waveform* arus stator normal dan BRB saat *no-load*

Dari gambar sinyal arus stator tersebut, dapat dilihat bahwa motor induksi yang mengalami BRB memiliki bentuk gelombang sinus yang masih rata, sama seperti pada sinyal arus stator dengan batang rotor normal. Dimana pada gelombang sinus tersebut tidak terdapat *ripple*.

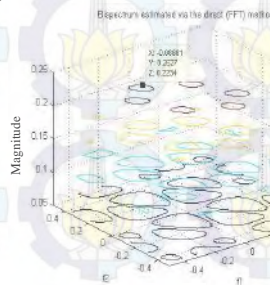
Pada pembahasannya sebelumnya dijelaskan bahwa *bi-spectrum* memiliki sensitivitas yang lebih tinggi khususnya saat motor induksi dioperasikan dalam kondisi tanpa beban dan atau pembebanan yang rendah. Hal ini dapat dibuktikan dengan adanya perubahan magnitude *bi-spectrum* yang dihasilkan antara batang rotor normal dengan *broken rotor bar*. Berikut ini merupakan *contour bi-spectrum* dalam plot frekuensi – frekuensi – magnitude:



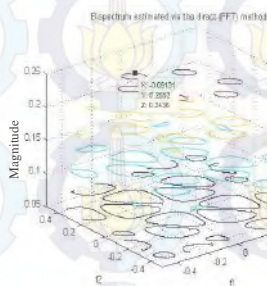
(a)



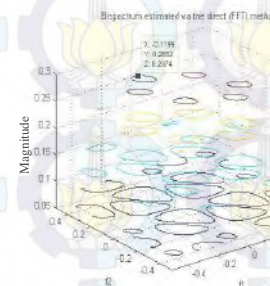
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4-4. Contour bi-spectrum saat no-load

- (a) Contour bi-spectrum normal
- (b) Contour bi-spectrum 1 BRB 3 mm
- (c) Contour bi-spectrum 1 BRB 7 mm
- (d) Contour bi-spectrum 3 BRB 3 mm
- (e) Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm

Berdasarkan *contour bi-spectrum* pada gambar 4-4 dapat dilihat adanya perubahan magnitude antara batang rotor normal dan batang rotor rusak. Dapat dijelaskan bahwa seiring dengan tingkat kedalaman pelubangan batang rotor dan jumlah *broken rotor bar* maka magnitude *bi-spectrum* yang dihasilkan semakin tinggi. Berikut ini nilai magnitude *bi-spectrum*:

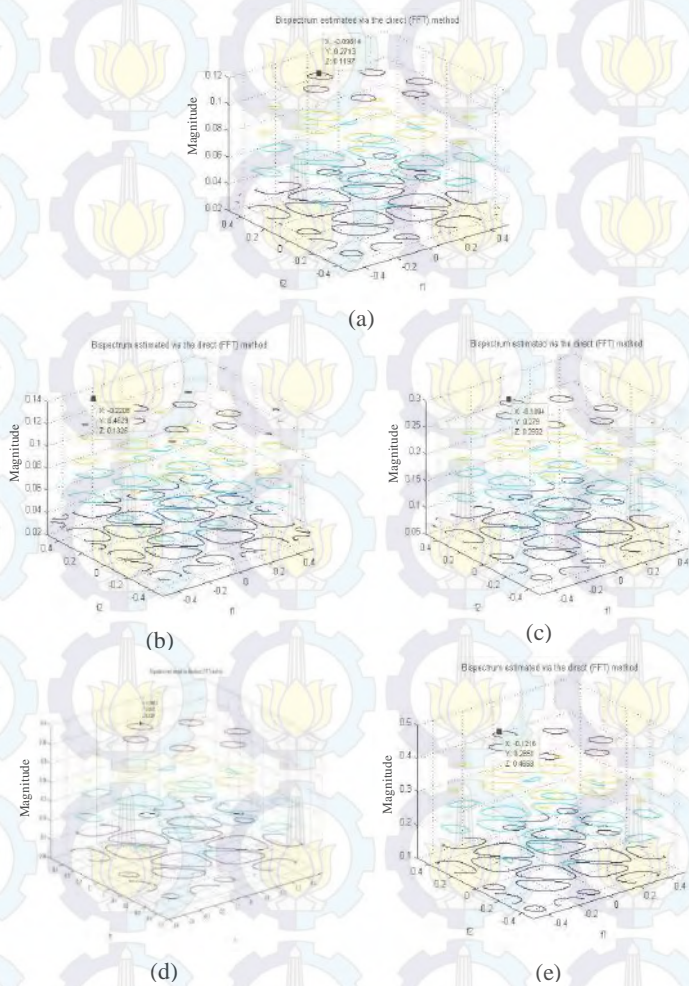
Tabel 4.2. Magnitude *bi-spectrum* saat *no-load*

Parameter Kerusakan	Magnitude <i>Bi-spectrum</i>
Normal	0.06686
1 BRB 3 mm	0.1
1 BRB 7 mm	0.2234
3 BRB 3 mm	0.2436
3 BRB 7 mm	0.2874

Rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi seiring dengan kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 3 mm sebesar 9% dan 11% seiring kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 7 mm. Sedangkan, rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* seiring dengan kenaikan tingkat kedalaman pelubangan adalah sebesar 8% untuk 1 BRB dan 11% untuk 3 BRB.

1.2.2. Deteksi *Broken Rotor Bar* Saat Motor Induksi Dibebani 900 Watt

Pengujian sistem deteksi *broken rotor bar* selanjutnya dilakukan saat motor induksi dibebani 900W. Pada kondisi ini, motor induksi terkopel dengan generator sinkron sebagai beban mekanis. Pada pembahasan sebelumnya dijelaskan bahwa pada motor induksi yang mengalami *broken rotor bar*, arus yang dihasilkan dari proses induksi medan stator yang mengalir pada rotor tidak terdistribusi sama rata pada seluruh rotor bar (asimetris). Batang rotor yang rusak akan mengalami penurunan kemampuan dalam mengalirkan arus sehingga arus akan dibebankan kepada batang rotor lain yang sehat. Hal ini juga berlaku pada saat motor dibebani 1.100 W, 1.300, dan saat kondisi *full-load* yaitu 1.500 W. Berikut ini merupakan *contour bi-spectrum* dalam plot frekuensi – frekuensi – magnitude:



Gambar 4-5. Contour bi-spectrum saat motor induksi dibebani 900 W

- (a) Contour bi-spectrum normal
- (b) Contour bi-spectrum 1 BRB 3 mm
- (c) Contour bi-spectrum 1 BRB 7 mm
- (d) Contour bi-spectrum 3 BRB 3 mm
- (e) Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm

Berdasarkan *contour bi-spectrum* pada gambar 4-5 dapat dilihat adanya perubahan magnitude antara batang rotor normal dan batang rotor rusak. Dapat dijelaskan bahwa semakin dalam tingkat pelubangan dan semakin banyak jumlah *broken rotor bar* atau dapat juga disebut dengan semakin parah tingkat kerusakan batang rotor maka magnitude *bi-spectrum* yang dihasilkan semakin tinggi pula. Dimana, semakin parah kerusakan maka arus stator akan semakin tinggi. Sehingga, kenaikan arus sebanding dengan magnitude *bi-spectrum*. Berikut ini nilai magnitude *bi-spectrum*:

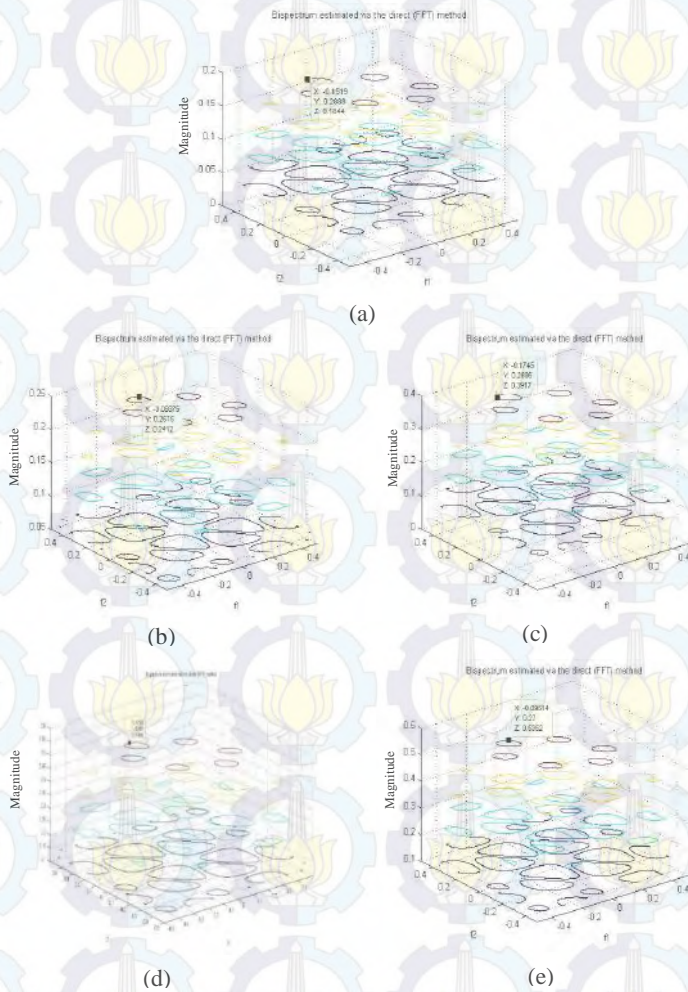
Tabel 4-3. Magnitude *bi-spectrum* saat dibebani 900 W

Parameter Kerusakan	Magnitude <i>Bi-spectrum</i>
Normal	0.1197
1 BRB 3 mm	0.1325
1 BRB 7 mm	0.2932
3 BRB 3 mm	0.3924
3 BRB 7 mm	0.4658

Rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi seiring dengan kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 3 mm sebesar 14% dan 17% seiring kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 7 mm. Sedangkan, rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* seiring dengan kenaikan tingkat kedalaman pelubangan adalah sebesar 9% untuk 1 BRB dan 17% untuk 3 BRB.

1.2.3. Deteksi Broken Rotor Bar Saat Motor Induksi Dibebani 1.100 Watt

Pada saat motor induksi dibebani 1.100 W, motor induksi terkopel dengan generator sinkron dimana generator sinkron ini terhubung dengan lampu sebagai beban elektris. Pada kondisi ini, lampu yang dinyalakan sebanyak 3 buah. Berikut merupakan hasil *contour bi-spectrum* pada plot frekuensi – frekuensi – magnitude saat motor dibebani 1.100 W:



Gambar 4-6. *Contour bi-spectrum* saat motor induksi dibebani 1.100 W

- (a) *Contour bi-spectrum* normal
- (b) *Contour bi-spectrum* 1 BRB 3 mm
- (c) *Contour bi-spectrum* 1 BRB 7 mm
- (d) *Contour bi-spectrum* 3 BRB 3 mm
- (e) *Contour bi-spectrum* 3 BRB 7 mm

Berdasarkan *contour bi-spectrum* pada gambar 4-6 dapat dilihat adanya perubahan magnitude antara batang rotor normal dan batang rotor rusak. Dapat dijelaskan bahwa semakin parah tingkat kerusakan batang rotor maka magnitude *bi-spectrum* yang dihasilkan semakin tinggi pula. Dimana, semakin parah kerusakan maka arus stator akan semakin tinggi. Sehingga, kenaikan arus sebanding dengan magnitude *bi-spectrum*. Berikut ini nilai magnitude *bi-spectrum*:

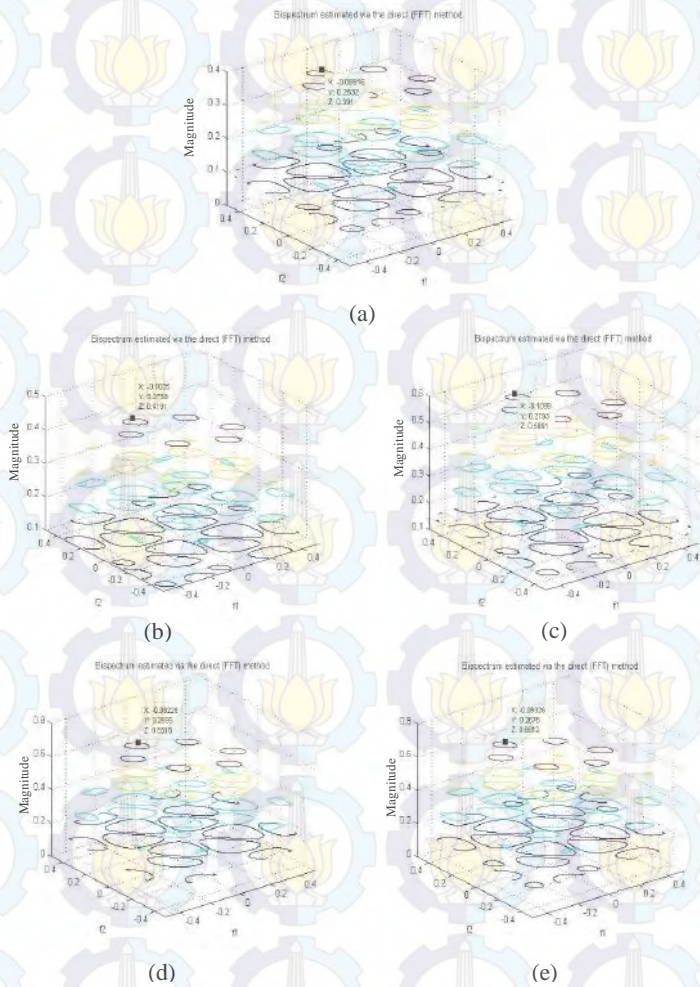
Tabel 4-4. Magnitude *bi-spectrum* saat dibebani 1.100 W

Parameter Kerusakan	Magnitude <i>Bi-spectrum</i>
Normal	0.1844
1 BRB 3 mm	0.2412
1 BRB 7 mm	0.3917
3 BRB 3 mm	0.5285
3 BRB 7 mm	0.5352

Rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi seiring dengan kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 3 mm sebesar 17% dan 18% seiring kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 7 mm. Sedangkan, rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* seiring dengan kenaikan tingkat kedalaman pelubangan adalah sebesar 10% untuk 1 BRB dan 18% untuk 3 BRB.

1.2.4. Deteksi *Broken Rotor Bar* Saat Motor Induksi Dibebani 1.300 Watt

Pada saat motor induksi dibebani 1.300 W, motor induksi terkopel dengan generator sinkron dimana generator sinkron ini terhubung dengan lampu sebagai beban elektris. Pada kondisi ini, lampu yang dinyalakan sebanyak 6 buah.



Gambar 4-7. *Contour bi-spectrum* saat motor induksi dibebani 1.300 W

- (a) *Contour bi-spectrum* normal
- (b) *Contour bi-spectrum* 1 BRB 3 mm
- (c) *Contour bi-spectrum* 1 BRB 7 mm
- (d) *Contour bi-spectrum* 3 BRB 3 mm
- (e) *Contour bi-spectrum* 3 BRB 7 mm

Berdasarkan *contour bi-spectrum* pada gambar 4-7 dapat dilihat adanya perubahan magnitude antara batang rotor normal dan batang rotor rusak. Dapat dijelaskan bahwa semakin parah tingkat kerusakan batang rotor baik dari segi kedalaman pelubangan rotor maupun jumlah BRB-nya, maka magnitude *bi-spectrum* yang dihasilkan semakin tinggi pula. Dimana, semakin parah kerusakan maka arus stator akan semakin tinggi. Sehingga, kenaikan arus sebanding dengan magnitude *bi-spectrum*. Berikut ini nilai magnitude *bi-spectrum*:

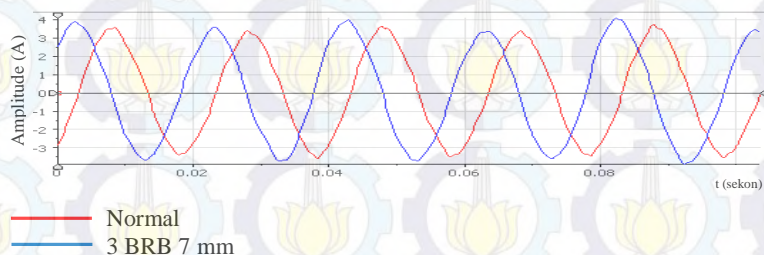
Tabel 4-5. Magnitude *Bi-spectrum* saat dibebani 1.300 W

Parameter Kerusakan	Magnitude <i>Bi-spectrum</i>
Normal	0.391
1 BRB 3 mm	0.4191
1 BRB 7 mm	0.5891
3 BRB 3 mm	0.6518
3 BRB 7 mm	0.6612

Rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi seiring dengan kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 3 mm sebesar 13% dan 14% seiring kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 7 mm. Sedangkan, rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* seiring dengan kenaikan tingkat kedalaman pelubangan adalah sebesar 10% untuk 1 BRB dan 14% untuk 3 BRB.

1.2.5. Deteksi Broken Rotor Bar Saat Kondisi Full-load

Pada saat motor induksi dalam kondisi *full-load*, motor induksi dibebani sesuai dengan rating dayanya, yaitu sebesar 1.500 W. Motor induksi terkopel dengan generator sinkron, dimana generator sinkron ini terhubung dengan lampu sebagai beban listrik. Pada kondisi ini, lampu yang dinyalakan sebanyak 9 buah. Saat motor induksi telah dibebani pada rating *full-load*-nya, sinyal arus stator dalam bentuk gelombang sinus antara rotor motor induksi saat normal dan yang mengalami BRB masih tetap tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Namun, bentuk gelombang sinus yang dihasilkan, pada posisi puncaknya tidak sama dengan gelombang sinus yang dihasilkan pada saat kondisi *no-load*. Dimana, pada kondisi *full-load* gelombang sinus pada bagian puncaknya tidak rata sempurna seperti yang digambarkan pada gambar 4-8.



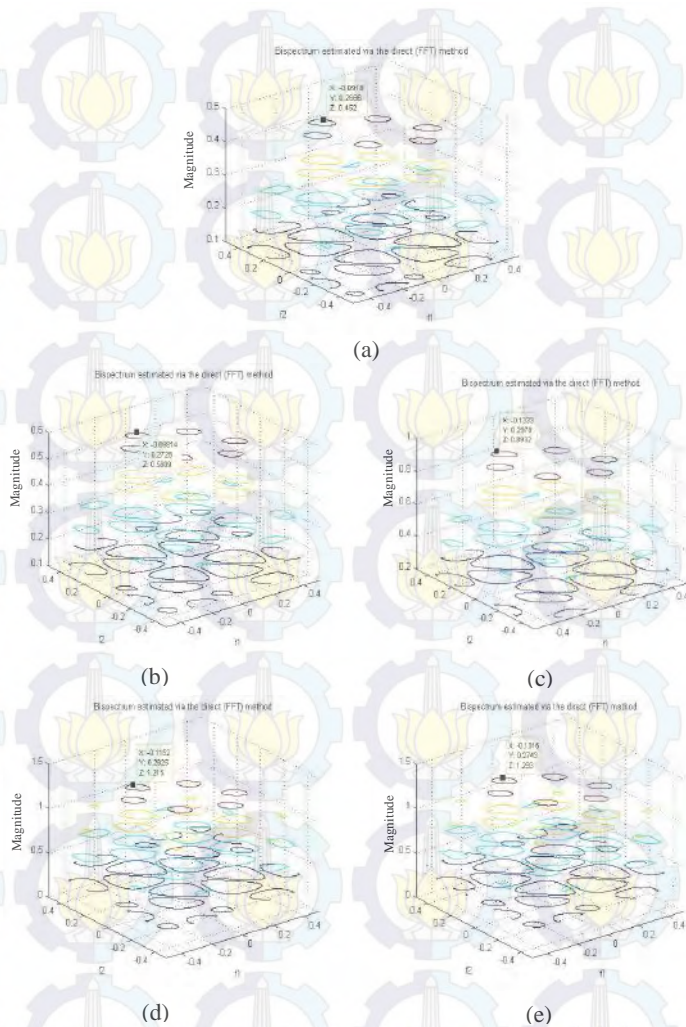
Gambar 4-8. Waveform arus stator normal dan BRB saat *full-load*

Berdasarkan *contour bi-spectrum* pada gambar 4-9 dapat dilihat adanya perubahan magnitude antara batang rotor normal dan batang rotor rusak. Dapat dijelaskan bahwa semakin dalam tingkat pelubangan dan semakin banyak jumlah *broken rotor bar* atau dapat juga disebut dengan semakin parah tingkat kerusakan batang rotor maka magnitude *bi-spectrum* yang dihasilkan semakin tinggi pula. Dimana, semakin parah kerusakan maka arus stator akan semakin tinggi. Sehingga, kenaikan arus sebanding dengan magnitude *bi-spectrum*. Berikut ini nilai magnitude *bi-spectrum*:

Tabel 4-6. Magnitude *bi-spectrum* saat *full-load*

Parameter Kerusakan	Magnitude <i>Bi-spectrum</i>
Normal	0.452
1 BRB 3 mm	0.5809
1 BRB 7 mm	0.8932
3 BRB 3 mm	1.215
3 BRB 7 mm	1.293

Rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi seiring dengan kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 3 mm sebesar 9% dan 11% seiring kenaikan jumlah BRB pada tingkat kedalaman 7 mm. Sedangkan, rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* seiring dengan kenaikan tingkat kedalaman pelubangan adalah sebesar 8% untuk 1 BRB dan 11% untuk 3 BRB.



Gambar 4-9. *Contour bi-spectrum saat full-load*

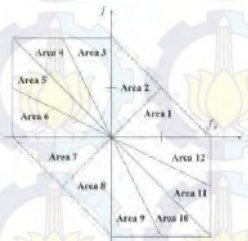
- (a) *Contour bi-spectrum normal*
- (b) *Contour bi-spectrum 1 BRB 3 mm*
- (c) *Contour bi-spectrum 1 BRB 7 mm*
- (d) *Contour bi-spectrum 3 BRB 3 mm*
- (e) *Contour bi-spectrum 3 BRB 7 mm*

1.3. Deteksi *Broken Rotor Bar* Berdasarkan Normalisasi *Bi-spectrum (Bicoherence)*

Bicoherence merupakan salah satu metode yang dapat mendeteksi *quadratic phase coupling* yang timbul terkait harmonisa dan adanya interaksi antara beberapa frekuensi yang *nonlinear* sehingga menimbulkan frekuensi baru. *Bicoherence* yang bernilai antara 0 sampai 1 mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling*. *Quadratic phase coupling* dapat juga muncul saat motor masih dalam kondisi normal. Hal ini dikarenakan, motor itu sendiri memiliki interaksi instrinsik *nonlinear (intrinsic nonlinear interaction)* yang dapat disebabkan karena harmonisa yang memang ada pada motor tersebut karena efek *air gap*. *Bicoherence* memiliki kelemahan, yaitu tidak bisa menghilangkan *intrinsic nonlinear* yang ada pada kondisi normal. Berdasarkan hasil pengujian dari beberapa *sample* yang dilakukan, nilai *bicoherence* pada kondisi normal berada diantara nilai 0.1 – 0.2 pada setiap *level* pembebanan. Sehingga, dapat dikatakan bahwa jika nilai *bicoherence* lebih dari 0.2 maka terdapat interaksi *nonlinear* yang diakibatkan karena *broken rotor bar*.

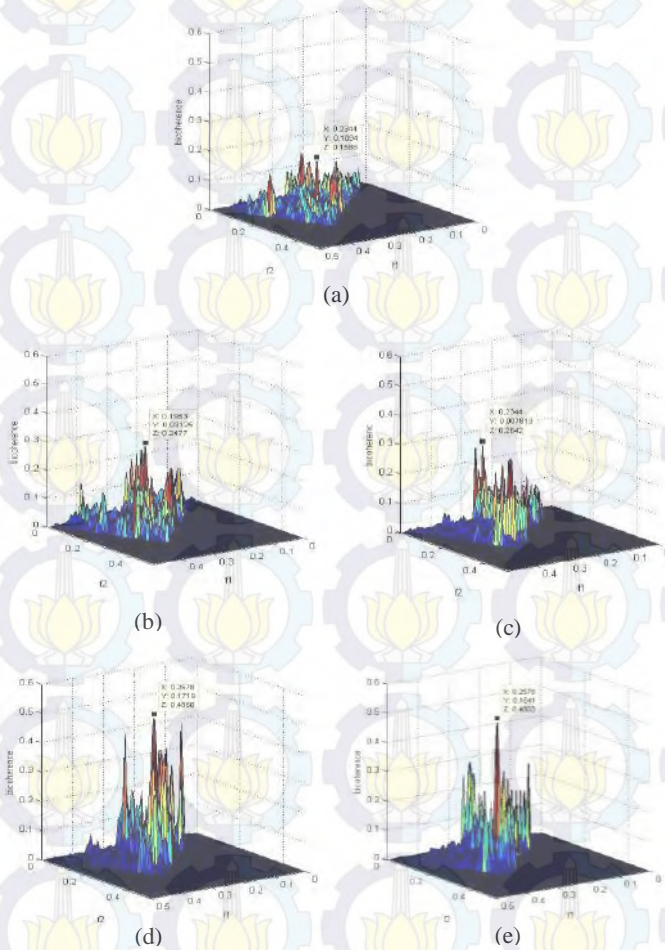
Seiring dengan kemampuan mesin yang turun dan meningkatnya kerusakan batang rotor, karakteristik operasi dari motor induksi tersebut cenderung menjadi lebih *nonlinear*. Meningkatnya ketidaklinearan menghasilkan frekuensi “baru” terkait dengan harmonisa dan kombinasi penjumlahan dari beberapa frekuensi “asli”. Berikut ini merupakan analisa mengenai deteksi *broken rotor bar* yang diindikasikan dengan adanya *quadratic phase coupling* berdasarkan normalisasi *bi-spectrum (bicoherence)*.

Bi-spectrum memiliki sifat simetris yang terbagi menjadi 12 area yang ditunjukkan pada gambar 4-10. Area yang dianalisa pada kasus *bicoherence* ini adalah Area 1. Area 1 hanya melihat f_1 dan f_2 yang ditunjukkan dengan i sebagai sumbu x dan j sebagai sumbu y dari nilai positif saja



Gambar 4-10. Map area dari sifat simetris *bi-spectrum* [6]

1.3.1. Deteksi *Broken Rotor Bar* Saat Kondisi *No-load*



Gambar 4-11. *Spectrum bicoherence* saat *no-load*

- (a) *Spectrum bi-spectrum* normal
- (b) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 3 mm
- (c) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 7 mm
- (d) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 3 mm
- (e) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 7 mm

Gambar 4-11 merupakan spectrum dari *bicoherence* yang di plot pada area segitiga sesuai dengan sifat simetris yang dimiliki oleh *bispectrum* dan dibatasi oleh teorema Nyquist. Sebagai tambahan, frekuensi yang diplot pada spektrum *bicoherence* merupakan frekuensi yang telah dinormalisasi. Oleh karena itu, untuk mengetahui frekuensi aktual maka perlu dikalikan dengan frekuensi *sampling*. Frekuensi *sampling* yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah 5.000 Hz.

Berdasarkan plot *bicoherence* pada gambar 4-11 dapat dijelaskan bahwa kerusakan batang rotor menimbulkan *peak-peak* baru. Adanya *peak-peak* tambahan yang muncul ini mengindikasikan tingginya derajat dari phase coupling yang sesuai dengan aturan $k = i + j$ dimana $(i, j) = (f_1, f_2)$ merupakan koordinat dari peak yang paling dominan. *Peak-peak* ini mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang muncul karena adanya interaksi antar frekuensi yang tidak linear.

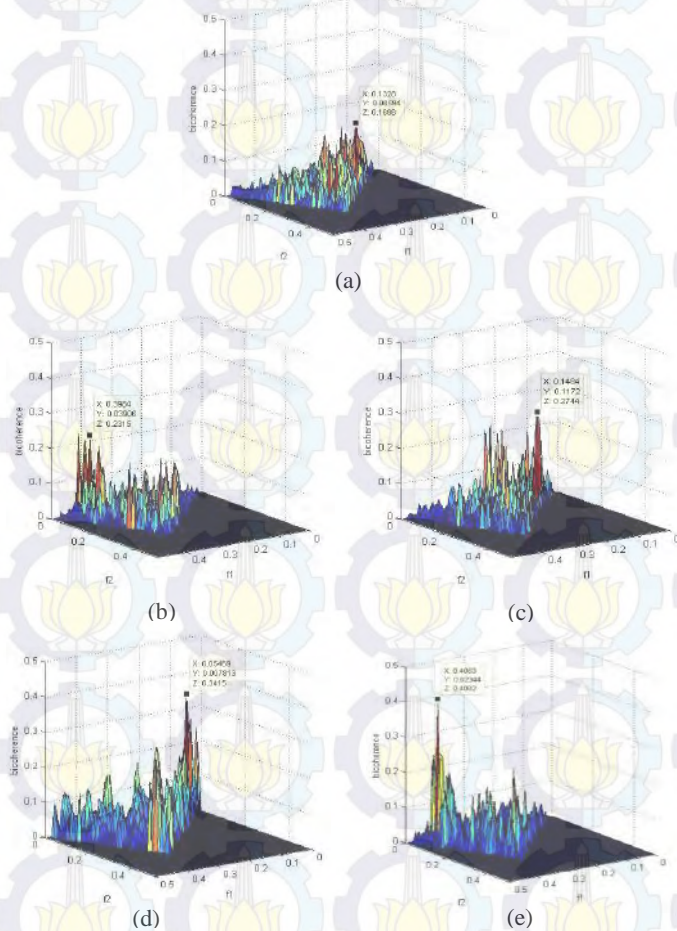
Diantara *peak-peak bicoherence*, nilai *bicoherence* yang lebih besar terdapat pada koordinat $(i, j) = (f_1, f_2) = (0.25, 0.2422)$ Hz saat motor mengalami 1 BRB dengan kedalaman 3 mm. Sehingga *quadratic phase coupling* yang dominan muncul pada frekuensi aktual (1250, 1211) Hz. Tabel 4-7 merupakan koordinat (f_1, f_2) yang mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang paling dominan muncul untuk setiap parameter kerusakan.

Tabel 4-7. Koordinat (f_1, f_2) dan *bicoherence* saat no-load

Parameter Kerusakan	Koordinat (f_1, f_2) Normlisasi	Koordinat (f_1, f_2) Aktual	<i>Bicoherence</i>
Normal	(0.2344, 0.1094)	(1172, 547)	0.1588
1 BRB 3 mm	(0.1953, 0.0313)	(976.5, 156.522)	0.2477
1 BRB 7 mm	(0.2344, 0.0078)	(1172, 39)	0.2642
3 BRB 3 mm	(0.2578, 0.1719)	(1289, 859.5)	0.4968
3 BRB 7 mm	(0.2578, 0.1641)	(1289, 820.5)	0.4803

Pada kasus *broken rotor bar* menghasilkan *peak-peak* baru pada area frekuensi tinggi di sekitar band 1.000 Hz. Semakin banyak jumlah *broken rotor bar* maka *peak-peak* tambahan yang muncul semakin banyak untuk kondisi BRB pada tingkat kedalaman yang sama dan nilai *bicoherence* lebih tinggi.

1.3.2. Deteksi *Broken Rotor Bar* Saat Motor Induksi Dibebani 900 Watt



Gambar 4-12. *Spectrum bicoherence* saat motor induksi dibebani 900 W

- (a) *Spectrum bi-spectrum* normal
- (b) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 3 mm
- (c) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 7 mm
- (d) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 3 mm
- (e) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 7 mm

Berdasarkan plot *bicoherence* pada gambar 4-12 dapat dijelaskan bahwa kerusakan batang rotor menimbulkan *peak-peak* baru. Adanya *peak-peak* tambahan yang muncul ini mengindikasikan tingginya derajat dari phase coupling yang sesuai dengan aturan $k = i + j$ dimana (i, j) merupakan koordinat dari peak yang paling dominan. *Peak-peak* ini mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang muncul karena adanya interaksi antar frekuensi yang tidak linear.

Tabel 4-8 merupakan koordinat (f_1, f_2) yang mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang paling dominan muncul untuk setiap parameter kerusakan.

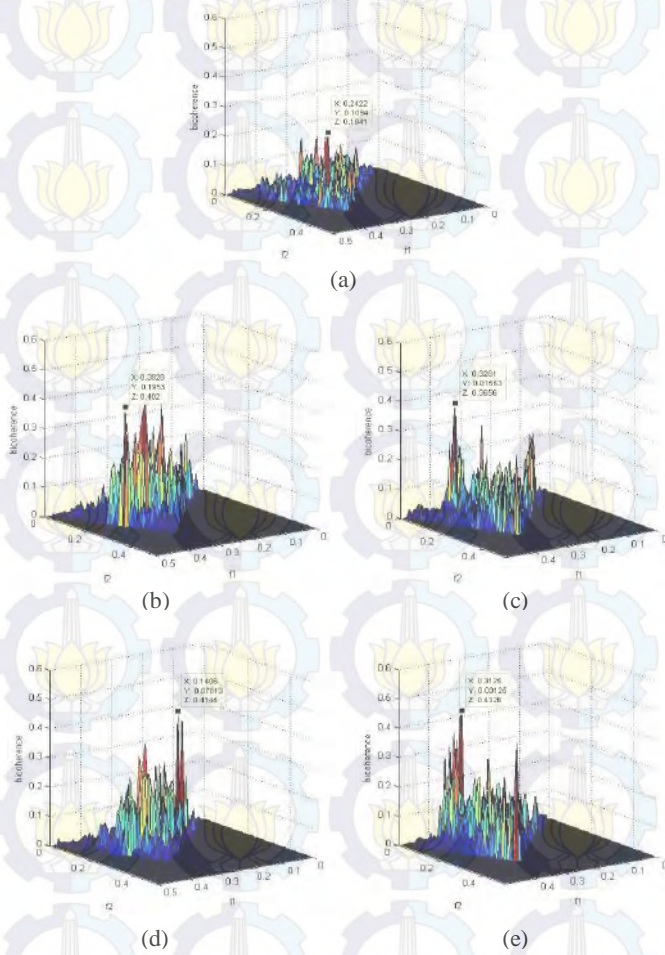
Tabel 4-8. Koordinat (f_1, f_2) dan *bicoherence* saat dibebani 900 W

Parameter Kerusakan	Koordinat (f_1, f_2) Normlisasi	Koordinat (f_1, f_2) Aktual	<i>Bicoherence</i>
Normal	(0.1328,0.0859)	(664,429.5)	0.1698
I BRB 3 mm	(0.3984,0.0391)	(1992,195.5)	0.2315
1 BRB 7 mm	(0.1484,0.1172)	(742,586)	0.2744
1 BRB 3 mm	(0.0547,0.0078)	(273.5,39)	0.3415
1 BRB 7 mm	(0.4063,0.0234)	(2031.5,117)	0.4002

Semakin banyak jumlah *broken rotor bar* maka *peak-peak* tambahan yang muncul semakin banyak untuk kondisi BRB pada tingkat kedalaman yang sama dan nilai *bicoherence* lebih tinggi.

1.3.3. Deteksi *Broken Rotor Bar* Saat Motor Induksi Dibebani 1.100 Watt

Berdasarkan plot *bicoherence* pada gambar 4-13 dapat dijelaskan bahwa kerusakan batang rotor menimbulkan *peak-peak* baru. Adanya *peak-peak* tambahan yang muncul ini mengindikasikan tingginya derajat dari phase coupling yang sesuai dengan aturan $k = i + j$ dimana (i, j) merupakan koordinat dari peak yang paling dominan. *Peak-peak* ini mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang muncul karena adanya interaksi antar frekuensi yang tidak linear.



Gambar 4-13. *Spectrum bicoherence* saat motor induksi dibebani 1.100 W

- (a) *Spectrum bi-spectrum* normal
- (b) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 3 mm
- (c) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 7 mm
- (d) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 3 mm
- (e) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 7 mm

Tabel 4-9 merupakan koordinat (f_1, f_2) yang mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang paling dominan muncul untuk setiap parameter kerusakan.

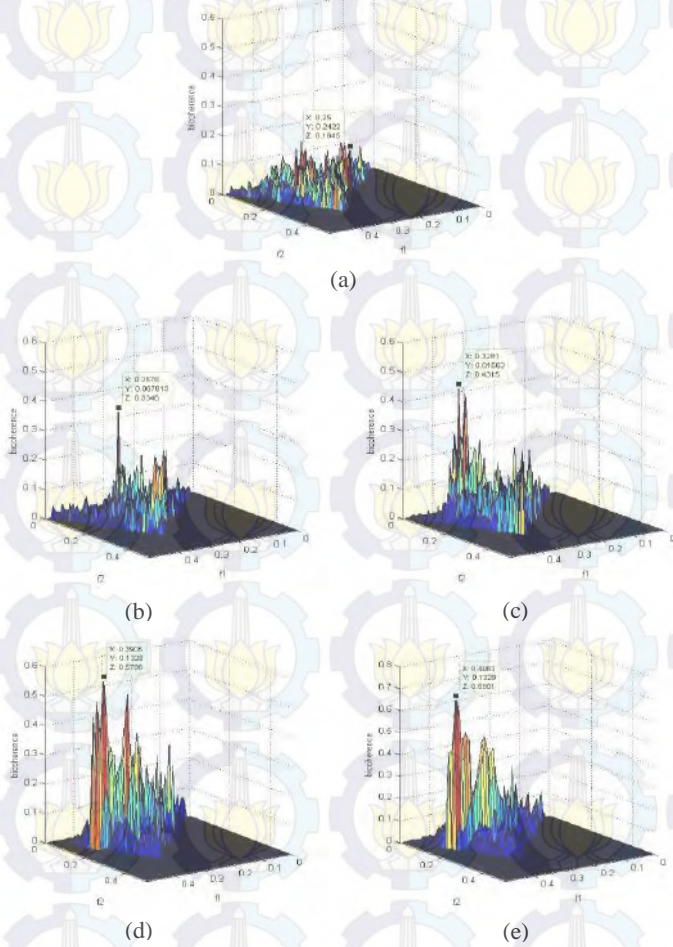
Tabel 4-9. Koordinat (f_1, f_2) dan *bicoherence* saat dibebani 1.100 W

Parameter Kerusakan	Koordinat (f_1, f_2) Normlisasi	Koordinat (f_1, f_2) Aktual	<i>Bicoherence</i>
Normal	(0.2422,0.1094)	(1211,547,)	0.1941
1 BRB 3 mm	(0.3828,0.1953)	(1914,976,5)	0.402
1 BRB 7 mm	(0.3281,0.0156)	(1640.5,78)	0.3656
3 BRB 3 mm	(0.1406,0.0781)	(703,390.5)	0.4144
3 BRB 7 mm	(0.3281,0.0156)	(1640.5,78)	0.4326

Semakin banyak jumlah *broken rotor bar* maka *peak-peak* tambahan yang muncul semakin banyak untuk kondisi BRB pada tingkat kedalaman yang sama dan nilai *bicoherence* lebih tinggi.

1.3.4. Deteksi *Broken Rotor Bar* Saat Motor Induksi Dibebani 1.300 Watt

Berdasarkan plot *bicoherence* pada gambar 4-11 dapat dijelaskan bahwa kerusakan batang rotor menimbulkan *peak-peak* baru. Adanya *peak-peak* tambahan yang muncul ini mengindikasikan tingginya derajat dari phase coupling yang sesuai dengan aturan $k = i + j$ dimana (i, j) merupakan koordinat dari peak yang paling dominan. *Peak-peak* ini mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang muncul karena adanya interaksi antar frekuensi yang tidak linear.



Gambar 4-14. *Spectrum bicoherence* saat dibebani 1.300 W

- (a) *Spectrum bicoherence* normal
- (b) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 3 mm
- (c) *Spectrum bicoherence* 1 BRB 7 mm
- (d) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 3 mm
- (e) *Spectrum bicoherence* 3 BRB 7 mm

Tabel 4-10 merupakan koordinat (f_1, f_2) yang mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang paling dominan muncul untuk setiap parameter kerusakan.

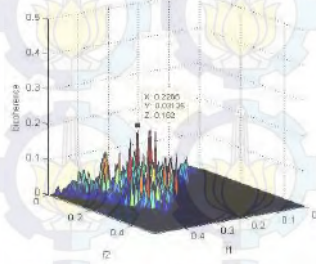
Tabel 4-10. Koordinat (f_1, f_2) dan *bicoherence* saat dibebani 1.300 W

Parameter Kerusakan	Koordinat (f_1, f_2) Normlisasi	Koordinat (f_1, f_2) Aktual	<i>Bicoherence</i>
Normal	(0.25,0.2422)	(1250,1211)	0.1845
1 BRB 3 mm	(0.2578,0.0078)	(1289,39)	0.3346
1 BRB 7 mm	(0.3281,0.0156)	(1640.5,78)	0.4315
3 BRB 3 mm	(0.3906,0.1328)	(1953,664)	0.5796
3 BRB 7 mm	(0.4063,0.1328)	(2031.5,664)	0.6901

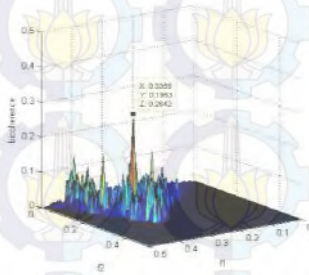
Semakin banyak jumlah *broken rotor bar* maka *peak-peak* tambahan yang muncul semakin banyak untuk kondisi BRB pada tingkat kedalaman yang sama dan nilai *bicoherence* lebih tinggi.

1.3.5. Deteksi Broken Rotor Bar Saat Kondisi Full-load

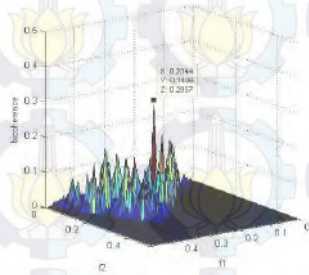
Berdasarkan plot *bicoherence* pada gambar 4-15 dapat dijelaskan bahwa kerusakan batang rotor menimbulkan *peak-peak* baru. Adanya *peak-peak* tambahan yang muncul ini mengindikasikan tingginya derajat dari phase coupling yang sesuai dengan aturan $k = i + j$ dimana (i, j) merupakan koordinat dari peak yang paling dominan. *Peak-peak* ini mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang muncul karena adanya interaksi antar frekuensi yang tidak linear.



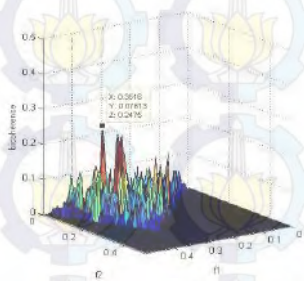
(a)



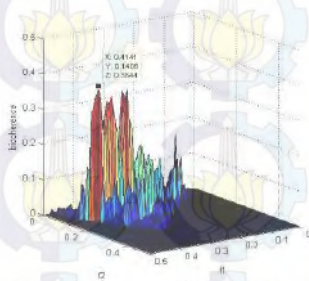
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4-15. *Spectrum bicoherence saat full-load*

- (a) *Spectrum bicoherence normal*
- (b) *Spectrum bicoherence 1 BRB 3 mm*
- (c) *Spectrum bicoherence 1 BRB 7 mm*
- (d) *Spectrum bicoherence 3 BRB 3 mm*
- (e) *Spectrum bicoherence 3 BRB 7 mm*

Tabel 4-11 merupakan koordinat (f_1, f_2) yang mengindikasikan adanya *quadratic phase coupling* yang paling dominan muncul untuk setiap parameter kerusakan.

Tabel 4-11. Koordinat (f_1, f_2) dan *bicoherence* saat *full-load*

Parameter Kerusakan	Koordinat (f_1, f_2) Normlisasi	Koordinat (f_1, f_2) Aktual	<i>Bicoherence</i>
Normal	(0.2266,0.0313)	(1133,156,5)	0.162
1 BRB 3 mm	(0.3828,0.1719)	(1914,859,5)	0.2842
1 BRB 7 mm	(0.2344,0.1406)	(1172,703)	0.2957
3 BRB 3 mm	(0.3516,0.0781)	(1758,390.5)	0.2475
3 BRB 7 mm	(0.4141,0.1406)	(2070.5,703)	0.3844

Semakin banyak jumlah *broken rotor bar* maka *peak-peak* tambahan yang muncul semakin banyak untuk kondisi BRB pada tingkat kedalaman yang sama dan nilai *bicoherence* lebih tinggi.

1.4. Pengaruh Pembebanan Terhadap Sistem Deteksi *Broken Rotor Bar*

Pada sub bab sebelumnya telah dijelaskan mengenai sistem deteksi *broken rotor bar* pada setiap *level* pembebanan. Hasil pengujian sistem deteksi *broken rotor bar* dianalisa dengan metode *bi-spectrum* mulai dari kondisi *no-load* hingga *full-load*.

Pada sub bab ini akan menjelaskan pengaruh atau dampak yang ditimbulkan akibat variasi pembebanan terhadap sistem deteksi *broken rotor bar*. Seiring dengan meningkatnya *level* pembebanan maka arus yang mengalir akan semakin besar pula. Pada penjelasan sebelumnya dijelaskan bahwa magnitudo *bi-spectrum* yang dihasilkan sebanding dengan nilai arus stator. Semakin besar arus yang mengalir maka magnitudo *bi-spectrum* juga semakin besar. Hal ini berarti semakin besar pembebanan yang diberikan maka magnitudo *bi-spectrum* akan semakin tinggi. Sehingga, magnitudo *bi-spectrum* sebanding dengan beban yang diberikan. Tabel 4-12 merupakan nilai magnitudo *bi-spectrum* seiring dengan kenaikan beban.

Tabel 4-12. Magnitude *bi-spectrum* pada berbagai tingkat pembebanan

Parameter Kerusakan	Magnitude <i>Bi-spectrum</i> pada Kondisi Pembebanan				
	<i>No-load</i>	900 W	1.100 W	1.300 W	<i>Full-load</i>
Normal	0.006686	0.1197	0.1844	0.391	0.452
1 BRB 3 mm	0.1	0.1325	0.2412	0.4191	0.5809
1 BRB 7 mm	0.2234	0.2932	0.3917	0.5891	0.8932
3 BRB 3 mm	0.2436	0.3924	0.5285	0.6518	1.215
3 BRB 7 mm	0.2874	0.4658	0.5352	0.6612	1.293

Rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi saat batang rotor motor induksi masih dalam keadaan normal seiring dengan kenaikan *level* pembebanan adalah sebesar 10%. Kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi saat batang rotor motor induksi mengalami 1 BRB seiring dengan kenaikan *level* pembebanan adalah sebesar 12% untuk kedalaman 3 mm dan 17% untuk kedalaman 7 mm. Rata-rata kenaikan magnitude *bi-spectrum* pada motor induksi saat batang rotor motor induksi mengalami 3 BRB seiring dengan kenaikan *level* pembebanan adalah sebesar 24% untuk kedalaman 3 mm dan 25% untuk kedalaman 7 mm.

Namun, variasi pembebanan tidak mempengaruhi nilai *bicoherence*. Nilai *bicoherence* pada kondisi normal seiring dengan variasi pembebanan tetap sekitar 0.1 – 0.2 p.u.

Tabel 4-13. *Bicoherence* pada berbagai tingkat pembebanan

Parameter Kerusakan	<i>Bicoherence</i> pada Kondisi Pembebanan				
	<i>No-load</i>	900 W	1.100 W	1.300 W	<i>Full-load</i>
Normal	0.1588	0.1698	0.1941	0.1845	0.162
1 BRB 3 mm	0.2477	0.2315	0.402	0.3346	0.2842
1 BRB 7 mm	0.2642	0.2744	0.3656	0.4315	0.2957
3 BRB 3 mm	0.4968	0.3415	0.4144	0.5796	0.2475
3 BRB 7 mm	0.4803	0.4002	0.4326	0.6901	0.3844

BAB 5 PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pengujian dan analisa data mengenai teknik sistem deteksi *broken rotor* pada motor induksi tiga-fasa didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. *Broken rotor bar* pada motor induksi dapat menyebabkan timbulnya *quadratic phase coupling* yang mengindikasikan adanya interaksi *nonlinear*,
2. *Bi-spectrum* dapat mendeteksi *broken rotor bar* berdasarkan kenaikan magnitude *bi-spectrum*. Magnitude *bi-spectrum* yang dihasilkan karena *broken rotor bar* akan lebih besar daripada motor induksi normal,
3. Normalisasi *bi-spectrum* (*bicoherence*) mampu mendeteksi koordinat (f_1, f_2) yang menimbulkan *quadratic phase coupling* yang paling dominan. Nilai *bicoherence* lebih dari 0.2 mengindikasikan bahwa motor induksi mengalami *broken rotor bar*,
4. Variasi pembebanan mempengaruhi besar magnitude sinyal arus stator dan magnitude *bi-spectrum*, namun tidak mempengaruhi nilai *bicoherence*.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. *Bi-spectrum* dapat digunakan tidak hanya untuk mendeteksi *broken rotor bar* pada saat kondisi *steady-state*, namun dapat juga diaplikasikan pada saat kondisi *starting*,
2. Mengembangkan *bicoherence* tingkat lanjut sehingga *intrinsic nonlinear interaction* pada motor induksi normal dapat dihilangkan.

DAFTAR PUSTAKA

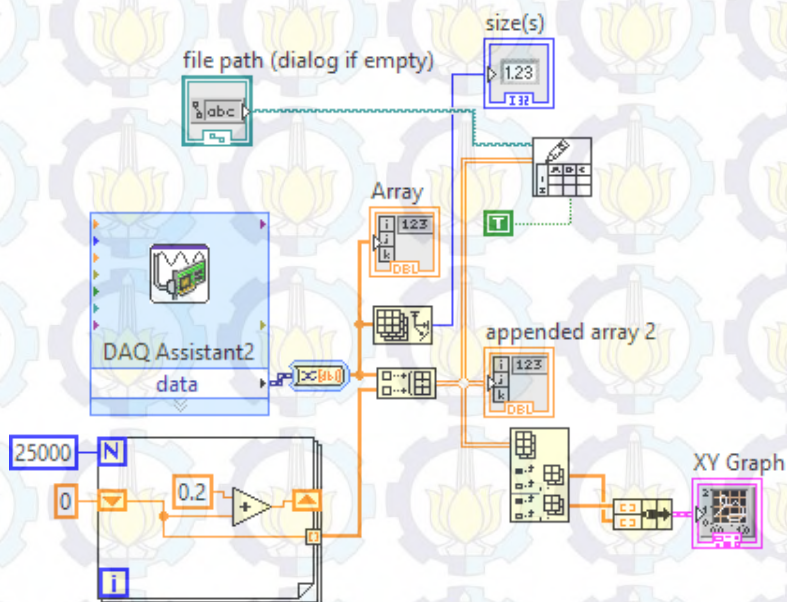
- [1] L. Saidi, H. Henao, F. Fnaiech, G-A. Capolino, and G. Cirrincione, "Application of Higher Order Spectral Analysis for Rotor Broken Bar Detection in Induction Machines," IEEE International Symposium on Diagnostic for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, pp. 31-38, 2011.
- [2] Chapman, Stephen J, "*Electric Machinery Fundamentals*", McGraw Hill, New York, 2005.
- [3] Abdurrahman, Sutedjo. "*Dasar-dasar Motor Induksi Tiga Phasa*", Maret 2011.
- [4] Swasetyasaki, Rifaldy. "*Tugas Akhir Deteksi Kerusakan Rotor Bar Motor Induksi Menggunakan Analisis Arus Output Inverter Berbasis Wavelet*", Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2013.
- [5] Rao, T. Subba dan M. M. Gabr., "*An Introduction to Bispectral Analysis and Bilinear Time Series Model*", Springer-Verlag, Belin, 1984.
- [6] Park, Hyeonsu, "*Nonlinearity Detection for Condition Monitoring Utilizing Higher-order Spectral Analysis Diagnostics*", The University of Texas, Austin, 2008.
- [7] Swami, Ananthram, Jerry M. Mendel, and Chrysostomos L. Nikias, "*Higher-Order Spectral Analysis Toolbox User's Guide*", The MathWorks, Massachusetts, 1998.
- [8] Miguel A. Armenta Loredó and Oscar G. Ibarra-Mamzán, "Application of Higher Order Spectral Analysis for Faults Detection in Induction Motors," IEEE International Conference on Electronics, Communication and Computing, pp. 144-148, 2013.
- [9] A. Alwodai, X. Yuan, Y. Shao, F. Gu, and A.D. Ball, "Modulation Signal Bispectrum Analysis of Motor Current Signals for Stator Faults Diagnosis," IEEE International Conference on Automation and Computing, pp. 1-6, 2012.
- [10] S. J. Oviedo, J. E. Quiroga, C. Borrás, "Experimental Evaluation of Motor Current Signature and Vibration Analysis for Rotor Broken Bars Detection in an Induction Motor," International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp. 1-6, 2011.
- [11] Chrysostomos L. Nikias and Jerry M. Mendel, "Signal Processing with Higher-Order Spectra," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 10-37, 1993.

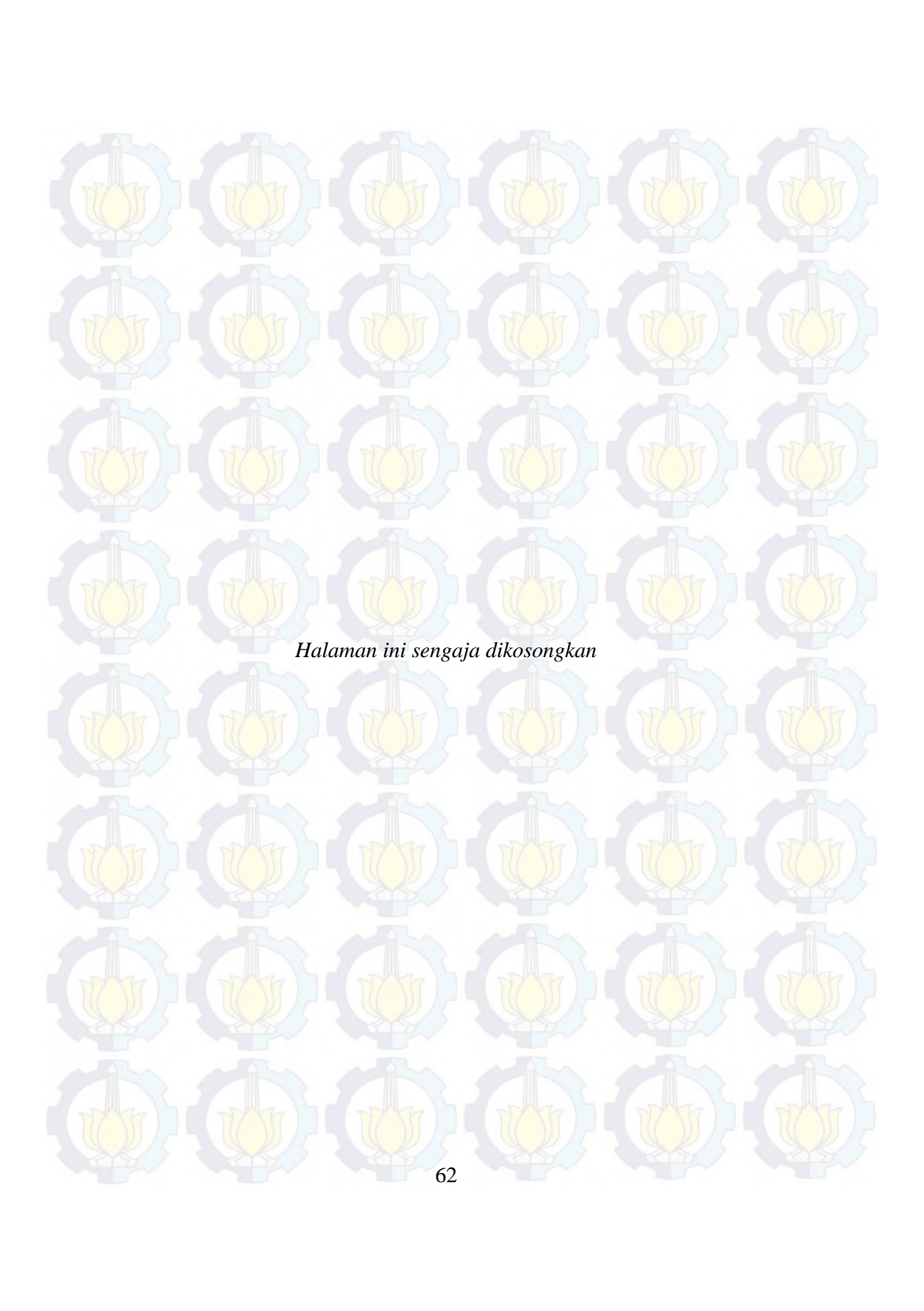
[12] Yudiastawan, I Gusti Putu, “*Tesis Deteksi Kerusakan Bearing dan Eccentricity pada Motor Induksi Tiga Fasa dengan Current Signature Analysis*”, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Program Magister Fisika Kekhususan Instrumentasi Universitas Indonesia, Depok, 2009.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Blok diagram pengambilan data arus





Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 2

Listing *Bi-spectrum*

```
function [Bspec,waxis] = bispecd (y,  nfft,
wind, nsamp, overlap)
%BISPECD Bispectrum estimation using the direct
(fft-based) approach.
% [Bspec,waxis] = bispecd (y,  nfft, wind,
segsamp, overlap)
% y - data vector or time-series
% nfft - fft length [default = power of two >
segsamp]
% wind - window specification for frequency-
domain smoothing
% if 'wind' is a scalar, it specifies
the length of the side
% of the square for the Rao-Gabr
optimal window [default=5]
% if 'wind' is a vector, a 2D window
will be calculated via
% w2(i,j) = wind(i) * wind(j) *
wind(i+j)
% if 'wind' is a matrix, it specifies
the 2-D filter directly
% segsamp - samples per segment [default: such
that we have 8 segments]
% - if y is a matrix, segsamp is set
to the number of rows
% overlap - percentage overlap [default = 50]
% - if y is a matrix, overlap is set
to 0.
% Bspec - estimated bispectrum: an nfft x
nfft array, with origin
% at the center, and axes pointing
down and to the right.
```

```

% waxis - vector of frequencies associated
with the rows and columnsnof Bspec; sampling
frequency is assumed to be 1.

% ----- parameter checks -----
y=xlsread('900W_R_20');
[ly, nrecs] = size(y);
if (ly == 1) y = y(:); ly = nrecs; nrecs =
1; end
if (exist('nfft') ~= 1) nfft =
2048; end
if (exist('overlap') ~= 1) overlap = 0;
end
overlap = min(99,max(overlap,0));
if (nrecs > 1) overlap = 0;
end
if (exist('nsamp') ~= 1) nsamp = 4;
end
if (nrecs > 1) nsamp =
ly; end

if (nrecs == 1 & nsamp <= 0)
nsamp = fix(ly/ (8 - 7 * overlap/100));
end
if (nfft < nsamp) nfft =
2^nextpow2(nsamp); end

overlap = fix(nsamp * overlap / 100);
% added 2/14
nadvance = nsamp - overlap;
nrecs = fix ( (ly*nrecs - overlap) /
nadvance);

% ----- create the 2-D window -----
if (exist('wind') ~= 1) wind = 5; end
[m,n] = size(wind);
window = wind;
if (max(m,n) == 1) % scalar: wind is size
of Rao-Gabr window

```

```

        winsize = wind;
        if (winsize < 0) winsize = 5; end %
    the window length L
        winsize = winsize - rem(winsize,2) + 1; %
    make it odd
        if (winsize > 1)
            mwind = fix (nfft/winsize);
            % the scale parameter M
            lby2 = (winsize - 1)/2;

            theta = -lby2:lby2;
            opwind = ones(winsize,1) * (theta .^2);
            % w(m,n)=m^2
            opwind = opwind + opwind' + theta' *
            theta; % m^2 + n^2 + mn
            opwind = 1 - (2*mwind/nfft)^2 * opwind;
            %
            hex = ones(winsize,1) * theta;
            % m
            hex = abs(hex) + abs(hex') +
            abs(hex+hex');
            hex = (hex < winsize);
            opwind = opwind .* hex;
            opwind = opwind * (4 * mwind^2) / (7 *
            pi^2) ;
        else
            opwind = 1;
        end

        elseif (min(m,n) == 1) % 1-D window passed:
            convert to 2-D
            window = window(:);
            if (any(imag(window) ~= 0))
                disp(['1-D window has imaginary
                components: window ignored'])
                window = 1;
            end
            if (any(window < 0))
                disp(['1-D window has negative
                components: window ignored'])
            end
        end
    end
end

```



```

        window = 1;
    end
    lwind = length(window);
    windf = [window(lwind:-1:2); window]; %
    the full symmetric 1-D
    window = [window; zeros(lwind-1,1)];
    opwind = (windf * windf') ...
        .* hankel(flipud(window), window);
    % w(m)w(n)w(m+n)
    winsize = length(window);

    else % 2-D window passed:
    use directly
        winsize = m;
        if (m ~= n)
            disp('2-D window is not square: window
ignored')
            window = 1;
            winsize = m;
        end
        if (rem(m,2) == 0)
            disp('2-D window does not have odd
length: window ignored')
            window = 1;
            winsize = m;
        end
        opwind = window;
    end

    % ----- accumulate triple products -----
    Bspec = zeros(nfft,nfft);

    mask = hankel([1:nfft],[nfft,1:nfft-1] );
    % the hankel mask (faster)
    locseg = [1:nsamp]';
    for krec = 1:nrecs
        xseg = y(locseg);
        Xf = fft(xseg-mean(xseg),
nfft)/nsamp;
        CXf = conj(Xf);

```

```

        Bspec = Bspec + (Xf * Xf.') .* ...
            reshape(CXf(mask), nfft, nfft);
        locseg = locseg + nadvance;
    end


    Bspec = fftshift(Bspec)/(nrecs);

    % ----- frequency-domain smoothing -----
    if (winsize > 1)
        lby2 = (winsize-1)/2;
        Bspec = conv2(Bspec,opwind);
        Bspec =
Bspec(lby2+1:lby2+nfft,lby2+1:lby2+nfft);
    End

    % ----- contour plot of magnitude bispectrum -----
    if (rem(nfft,2) == 0)
        waxis = [-nfft/2:(nfft/2-1)]'/nfft;
    else
        waxis = [-(nfft-1)/2:(nfft-1)/2)]'/nfft;
    end

    hold off, clf
    % contour(abs(Bspec),4,waxis,waxis),grid
    contour3(waxis,waxis,abs(Bspec),4),grid on
    title('Bispectrum estimated via the direct
(FFT) method')
    xlabel('f1'), ylabel('f2')
    set(gcf,'Name','Hosa BISPECTD')
    return

```



Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 3

Listing *Bicoherence*

```
function output = bicoherence(x)
% This is file bicoherence.m. The function
calculates
% the bicoherence of signals x = SP - PV
%
% References : Choudhury et al., Automatic
detection and quantification of stiction
% in control valves (in press) + Diagnosis of
poor control-loop performance using
% higher-loop statistics (brief
paper)

x=xlsread('NoLoad_R_1');
if length(x)/2 == round(length(x)/2)
else
    x = x(1:end-1);
end

% Segmentation of the input signal

LX = 64;           % segment length
LS = 128;          % DFT length
OV = 0.5;          % 50% overlap

k = 0;
cont = 0;
while cont == 0
    indices{k+1} = ((LX/2)*k+1:(LX/2)*k+LX+1);
    values = indices{k+1};
    k = k + 1;
    if values(end)>length(x) - LX/2
        cont = 1;
    end
end
```

```

end
end
numseg = length(indices);

% the while-loop above made the variable
"indices" be of the correct dimension
% to use the overlapping DFT-calculation of the
input signal.

% Construction of the bispectrum
for ix = 1:length(indices)
    clear mu x1 w x2 Y Bsp del de2
    % Remove the mean
    mu = mean(x(indices{ix}));
    x1 = x(indices{ix}) - mu;

    % Multiplication with the Hanning-window.
    Reference : page 547 in
    % Numerical Recipes
    for k = 1:length(x1)
        w(k) = 0.5 - 0.5*cos(2*pi*(k-1)/(LX-1));
    end

    x2 = w(:).*x1(:);

    % Calculation of the DFT (Y)
    Y = fft(x2,LS);
    for k = 1:LX
        for l = 1:LX
            Bsp(k,l) = Y(k)*Y(l)*conj(Y(k+l));
            del(k,l) = abs(Y(k)*Y(l))^2;
            de2(k,l) = abs(Y(k+l))^2;
        end
    end
    D1{ix} = del;    % Denominators in eq. 2 in
    Diagnosis... (Chudhury)
    D2{ix} = de2;

```

```

    Bs{ix} = Bsp;
end

% Calculation of the mean of the bispectrum and
the bicoherence

D1m = D1{1}; D2m = D2{1}; Bm = Bs{1};
for k = 2:length(Bs);
    D1m = D1m + D1{k};
    D2m = D2m + D2{k};
    Bm = Bm + Bs{k};
end
D1 = D1m/k; D2 = D2m/k; Bm = Bm/k;

bic2 = zeros(LX*2);
for k = 1:LX
    for l = 1:LX
        bic2(k+LX,l+LX) =
abs(Bm(k,l))^2/(D1(k,l)*D2(k,l));
    end
end

for k = 1:LX*2
    for l = 1:LX*2
        if (k <= LX)&(l <= LX)
            bican(k,l) = bic2(2*LX-k+1,2*LX-
l+1);
        elseif (k > LX)&(l <= LX)
            bican(k,l) = bic2(k,2*LX-l+1);
        elseif (k <= LX)&(l > LX)
            bican(k,l) = bic2(2*LX-k+1,l);
        elseif (k > LX)&l > bic2(k,l);
            bican(k,l) = bic2(k,l);
        end
    end
end
bicanp1 = bican;
bican = bican(LX+1:LX+LS/2,LX+1:LX+LS/2);

```



```
waxis = linspace(0,0.5,length(bican)+1);  
waxis = waxis(1:end-1);  
limit = waxis(end)*(2/3);
```

```
k = 1;  
while k < length(waxis)  
    if waxis(k)>limit  
        limit = k-1;  
        k = Inf;  
    else  
        k = k + 1;  
    end  
end
```

```
for f1 = 1:limit  
    for f2 = 1:length(waxis)  
        if f2 == 1 | f2 >= f1;  
            bican(f1,f2) = 0;  
        end  
    end  
end
```

```
for f1 = limit:length(waxis)  
    for f2 = 1:length(waxis)  
        if f2 == 1 | f2 >= -2*f1 +  
            length(waxis)*2  
            bican(f1,f2) = 0;  
        end  
    end  
end
```

```
cont = 1;  
for f1 = 1:length(waxis)  
    for f2 = 1:min([f1, -2*f1+length(Y)]);  
        bicpermed(cont) = bican(f1,f2);  
        cont = cont + 1;  
    end  
end
```

```

bic2m = mean(bicpermed);
bic2v = std(bicpermed);
bic2max = max(bicpermed);

surf(waxis,waxis,bican');
axis([0 0.5 0 0.5 0 1]);
    %set(hcc,'view',[145 15],'Alim',[0 1],...
    %    'Clim',[0 0.08]);
    view([145 15])

[c,rows] = max(bican');
[c,column] = max(max(bican'));
f1 = rows(column);
f2 = column;

output.f1 = waxis(f1);
output.f2 = waxis(f2);
xlabel('f1'), ylabel('f2'),zlabel('bicoherence')
return

```

RIWAYAT HIDUP



Penulis yang biasa dipanggil Bani lahir di Jakarta, 8 Oktober 1994. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menghabiskan pendidikan di TK Akbar, SD Negri Papandayan 1, SMP Kesatuan, hingga di SMA Kesatuan Bogor. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke bangku kuliah di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Insitut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Sejak menginjak perkuliahan di semester 5, penulis tergabung menjadi bagian dari asisten

Laboratorium Konversi Energi. Penulis juga aktif bertasipasi dalam berbagai kepanitian acara dan mengikuti lomba-lomba keilmiahan dan seminar-seminar. Penulis memiliki banyak pengalaman menarik selama tiga setengah tahun kuliah di Teknik Elektro. Penulis dapat dihubungi melalui email: **insannrabbani@yahoo.com**